

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Odvodnění zeminového podloží pomocí vertikálních drénů
Subsoil Drainage Using Vertical Drains

Student: Michal Steiner
Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Steiner**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Odvodnění zeminového podloží pomocí vertikálních drenů**
Subsoil Drainage Using Vertical Drains
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Úvod, funkce a typy vertikálních drenů
- 2) Princip vertikálních drenů, jejich návrh a instalace
- 3) Příklady aplikací vertikálních drenů na stavbách v ČR i zahraničí
- 4) Tvorba ilustračního výukového modelu funkce vertikálních drenů
- 5) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hulla, J., Turček, P. *Zakládání staveb*. Jaga: Bratislava, 1998. ISBN 80-88905-05-2.
2. Vaníček, I., Vaníček, M. *Earth Structures*. Springer: 2008. ISBN 978-1-4020-3963-8.
3. <http://www.cofra.sk/sk/produkty/Vertikalne-dreny-Mebradrain.alej>
4. http://www.wakachiku.co.jp/en/technologies/various_vertical_drain_methods.html
5. <http://www.vibromenard.co.uk/techniques/vertical-drains/>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2016

Datum odevzdání: 02.05.2017


doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. RNDr. Evě Hrubéšové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Děkuji také Ing. Janovi Petrů, Ph.D. a doc. Ing. Vladislavovi Křivdovi, Ph.D. za pomoc při 3D tisku.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá jednou z forem úpravy zeminového podloží a to odvodněním pomocí vertikálních drénů. V práci je vysvětleno, za jakých podmínek lze tuto metodu využít a do jaké míry ovlivní celý proces konsolidace, který je s instalací vertikálních drénů přímo spjatý. V práci jsou popsány dva základní typy vertikálních drénů (pískové a prefabrikované drény). Druhý typ je popsán podrobněji a to z hlediska funkce, výběru, instalace, vlastností i ověřovacích zkoušek jakosti. V práci jsou také uvedeny některé projekty, ať už z České republiky či zahraničí, kde byly vertikální drény použity. V praktické části je pak nastíněn proces výroby vlastního vertikálního drénu na 3D tiskárně a vytvoření ilustračního výukového modelu v zemině.

Klíčová slova: Konsolidace. Pórový tlak. Prefabrikované vertikální drény. Průtokové množství. Permeabilita.

Annotation

The Bachelor thesis deals with subsoil drainage using vertical drains, which is one of many forms of ground improvement. The work defines conditions, when we can use this method and how much it will affect the whole process of consolidation, which is directly linked to the installation of vertical drains. The thesis describes two basic types of vertical drains (sand drains and PVD). The second type is described in more detail – function, selection, installation and quality control tests. The work also presents some projects from Czech Republic or various countries, where vertical drains have been used. The practical part of the thesis is concerned with the process of manufacturing own vertical drain on 3D printer and creating illustrative educational model in the subsoil.

Keywords: Consolidation. Pore pressure. PVD. Drainage capacity. Permeability.

Obsah

Seznam použitého značení	9
1 Úvod	11
2 Konsolidační proces	13
3 Funkce vertikálních drénů	14
4 Typy vertikálních drénů	18
4.1 Pískové drény	18
4.2 Páskové geokompozitní drény (PVD drény)	20
4.2.1 Historie	21
4.2.2 Návrh	21
4.2.3 Typy PVD	24
4.2.4 Vlastnosti	25
4.2.4.1 Průtokové množství (drenážní kapacita)	26
4.2.4.2 Vlastnosti filtru	28
4.2.4.3 Pevnost v tahu	33
4.2.4.4 Smear zóna (porušená oblast)	33
4.2.5 Zkoušky na ověření jakosti PVD	35
4.2.5.1 Stanovení AOS geotextilie	35
4.2.5.2 Permeabilita (permitivita) filtru	36
4.2.5.3 Zkouška na průtokové množství	36
4.2.5.4 Zkouška tahového napětí	38
4.2.5.5 Další zkoušky	38
4.2.6 Instalace	39
5 Příklady aplikací vertikálních drénů na stavbách v ČR i zahraničí	40
5.1 Urychlení konsolidace podloží na železniční trati Bratislava Rača – Trnava	40
5.2 Urychlení konsolidace podloží na letišti Arlanda ve Stockholmu	42
5.3 Urychlení konsolidace šterkovými pilíři na úseku R55	43

6	Tvorba ilustračního výukového modelu funkce vertikálních drenů.....	45
6.1	Princip a vývoj 3D tisku	45
6.2	Tvorba modelu.....	45
6.3	3D tisk	46
6.4	Aplikace do odebraného vzorku zeminy	47
7	Závěr.....	50
	Seznam použité literatury.....	51
	Seznam tabulek	56
	Seznam obrázků	57
	Seznam vzorců	58
	Přílohy	59

Seznam použitého značení

A	– plocha [m^2]
C_c	– součinitel stlačitelnosti [-]
C_u	– neodvodněná pevnost ve smyku [kPa]
D	– faktor odporu drénu [-]
E_{oed}	– edometrický modul přetvárnosti [MPa]
E_u	– neodvodněný Youngův modul [kPa]
F_s	– redukční faktor [-]
Q	– rychlost proudění [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
R_t	– korekční faktor pro teplotu vody 20 °C [-]
S	– délka strany ve zvoleném rastru [m]
T	– časový faktor [-]
U	– stupeň konsolidace [%]
V	– objem vody [m^3]
c_h	– součinitel konsolidace ve vertikálním směru [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
c_v	– součinitel konsolidace ve vertikálním směru [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
d, D	– průměr [mm]
d_m	– ekvivalentní průměr trnu [m]
d_s	– průměr tzv. smear zóny [m]
d_w	– ekvivalentní průměr drénu [m]
f	– korekční faktor [-]
h	– nejdelší drenážní dráha zkušební vzorku [mm]
i	– hydraulický gradient [-]
k	– koeficient filtrace [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
k_h	– koeficient filtrace v horizontálním směru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
k_n	– koeficient permeability kolmo na rovinu řezu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
k_p	– koeficient permeability v rovině řezu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
k_v	– koeficient filtrace ve vertikálním směru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
l_m	– délka drenážní dráhy [m]
q_{req}	– požadované průtokové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
r	– poloměr [m]
q_w	– průtokové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
s_i	– stlačení vrstvy i [m]

t – čas [s]
 t_g – tloušťka geotextilie [m]
 u – neutrální napětí (pórový tlak) [MPa]
 z – poloha analyzovaného bodu ve vrstvě [m]
 ΔH – rozdíl výšek [m]
 θ – transmisivita geotextilie [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 ψ – permitivita geotextilie [s^{-1}]
 γ_w – objemová tíha vody [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$]
 δ – tloušťka filtru [m]
 ε – poměrná deformace [%]
 σ_{ef} – efektivní (účinné) napětí [MPa]
 σ_z – totální (celkové) napětí [MPa]

AOS – rozsah velikosti otvorů

FOS – rozsah velikosti otvorů značený v Evropě a Kanadě

MD – Mebradrain

PVD – prefabrikovaný vertikální drén

1 Úvod

Půda je součástí zemské kůry a to její nejsvrchnější části. Skládá se z pevné, kapalné a plynné fáze a je určena geologickými poměry, které se vyvíjely a měnily v čase, či antropogenními aktivitami (poddolování, těžba nerostných surovin, navážky). To má za následek rozdílné fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti. Zeminové podloží tudíž nemusí vyhovovat účelům stavebních konstrukcí (násyp, hráz, podzemní dílo, základová konstrukce budovy), tzn. zeminové podloží není pro dané zatížení dostatečné z hlediska mezního stavu únosnosti, resp. použitelnosti. Je proto nutné cíleně zlepšit fyzikální a mechanické vlastnosti v terénu tak, aby zeminy, popřípadě horniny, splňovaly veškeré požadavky kladené člověkem.

V posledních padesáti letech se vyvinula řada metod na úpravu vlastností hornin a zemin. Mnohé z nich vyžadují speciální vybavení, aby dosáhly kýženého efektu. Jednou z forem této úpravy je i odvodnění zeminového podloží pomocí vertikálních drenů, o čemž bude pojednávat má bakalářská práce.

Vertikální drény představují nenákladnou a technicky nenáročnou metodu úpravy zeminového podloží a v současné době jsou stále častěji využívány. Ve srovnání s původními typy prošly značným technickým vývojem, který pomohl zlepšit jejich drenážní, ale i mechanické vlastnosti.

Problematika odvodnění pomocí vertikálních drenů souvisí s konsolidačním procesem, jehož průběh i metody pro získání požadovaných parametrů se budu snažit nastínit. Hlavním tématem mé práce jsou však vertikální drény, které se v zásadě dělí na dva typy – pískové a prefabrikované, které prakticky nahradily prvně zmíněný typ a kterým se budu přednostně věnovat. Cílem této části bude popis různých variant a výrobců prefabrikovaných vertikálních drenů a také zhodnocení jejich základních vlastností a zkoušek ověření kvality. Na závěr představím některé projekty, kde byly vertikální drény využity.

V teoretické části jsem čerpal především z anglicky psané literatury, což se může projevit na některých odborných termínech, jejichž český ekvivalent bylo někdy obtížné najít. Primárním zdrojem mé práce byla kniha Ground Improvement od Klause Kircha a Alana Bella (2013) či Ground Improvement Techniques od Raje Purushothamy (2005).

V praktické části vytvořím ilustrační model funkce vertikálních drénů. Protože 3D tisk by v budoucnu mohl značně ovlivnit i stavebnictví a to konkrétně také geotechniku, rozhodl jsem se, že se procesem budu dále zabývat a vytvořím vlastní vzorky vertikálních drénů, které následně aplikuji do odebraného vzorku zeminy. Získám tím představu o drenážní funkci zeminového podloží pomocí vertikálních drénů.

2 Konsolidační proces

Vlivem rychlého rozvoje infrastruktury se mnoho stavebních projektů soustřeďuje do oblastí, které nejsou z důvodu složitých základových poměrů zastavěny, protože je zde podloží tvořeno neúnosnými, vysoce stlačitelnými a málo propustnými, vodou nasycenými zeminami. Mezi takové zeminy je možné zařadit např. jíly, písčité jíly, zvodnělé hlíny či rašeliny. Problém tkví v tom, že jakmile je dané zatížení způsobené stavební konstrukcí umístěno na takovýchto zeminách, může docházet ke kolapsu či značnému sedání zeminy. To komplikuje výstavbu stavebního díla a vyvolává negativní vliv na celkovou stabilitu [2].

V plastických zeminách, jako jsou jíly, tak dochází ke konsolidaci, což je obecně proces deformace zeminy v čase pod účinkem vnějšího zatížení. Je založen na principu vzájemného rozdělení totálního napětí mezi efektivní napětí (zrna skeletu) a neutrální napětí (pórový tlak) [1]:

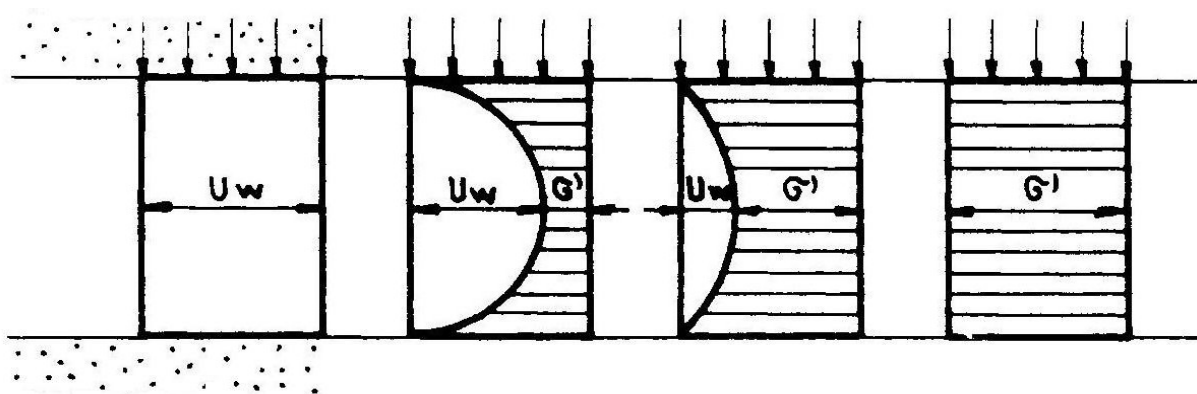
$$\sigma_z = \sigma_{ef} + u \quad (2.1)$$

kde: σ_z – totální (celkové) napětí

σ_{ef} – efektivní (účinné) napětí

u – neutrální napětí (pórový tlak)

Vlivem vnějšího zatížení dochází v zemině k pozvolnému vytlačování pórové vody do oblastí menšího tlaku a k postupnému rozptýlení vody do okolního prostředí. Zemina se tak stlačuje a postupně zpevňuje. Jedná se o proces primární konsolidace. Zrna zeminy se vlivem vytlačování pórové vody k sobě přibližují natolik, že se vzájemně ovlivňují a přejímají stále větší část vnějšího zatížení. Jakmile je pórový tlak snížen na nulovou hodnotu, tzn. pórová voda je dokonale vytlačena ze zeminy, veškeré vnější zatížení přenáší skelet a dochází zde k reologickým změnám zeminy. Tento proces se nazývá sekundární konsolidace. Ta se u plastických zemin nesmí zanedbat a zabývá se jí Boltzmann–Volterrova teorie dědičného přetváření [1].



Obr. 2.1 Statický průběh napětí v zemině při primární konsolidaci [27]

- kde
1. $t = 0, \sigma_z = u$
 - 2,3. $t > 0, \sigma_z = \sigma_{ef} + u$
 4. $t = \infty, \sigma_z = \sigma_{ef}$

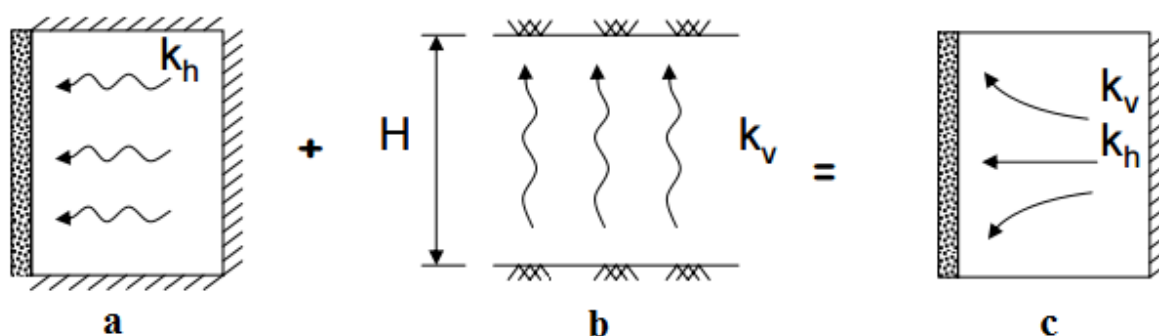
Doba konsolidace je určena na základě propustnosti a mocnosti konsolidované vrstvy a na jejích okrajových podmínkách, tzn., zda konsolidace probíhá v jednom nebo ve dvou směrech. Na celkovou hodnotu má také vliv aplikované přetížení (např. násyp v případě použití vertikálních drenů). Celkový proces u jílovitých zemin může být zdlouhavý a probíhá v řádu několika let. Jednou z možností je cíleně proces urychlit, tzn. co nejrychleji rozptýlit pórové tlaky a to použitím tradičních metod jako je odvodnění, přetížení povrchu nebo kombinace obou metod [2]. Je však důležité posoudit celkový postup, aby vlivem zvýšení pórových tlaků nedošlo ke kolapsu zeminového podloží nebo plánované stavební konstrukce.

Problematika odvodnění by se neměla podceňovat. Správné zvolení typu drenážního systému a jeho konstrukční uspořádání má vliv na celkový výsledek a dobu procesu. Odvodnění se dělí na horizontální, vertikální a kombinované. Cílem práce je podrobně popsat vertikální typ odvodnění pomocí drenů.

3 Funkce vertikálních drenů

Funkce vertikálních drenů je v podstatě jednoduchá a to shromáždit a cíleně odvést pórovou vodu z drénované oblasti (především z jemnozrnných zemin) v požadovaném množství, aby plánovaná stavební konstrukce (např. liniová či plošná dopravní nebo vodohospodářská stavba) mohla být založena na vyhovujícím podloží po celou dobu své životnosti [3].

Pórová voda proudí pod účinkem přitížení horizontálním směrem k nejbližšímu drénu, prostupuje do něj a vzlíná ke zhlaví, kde se odčerpává, odpařuje nebo jednoduše odvádí mimo drénovanou oblast. V důsledku zkrácení drenážních drah se konsolidační proces urychlí a požadovaného stupně konsolidace může být dosaženo již během výstavby. Snížení pórových tlaků poté způsobí změnu totálních smykových parametrů na efektivní, čímž se zvýší stabilita podloží [4].



a – radiální proudění; b – vertikální proudění; c – kombinace radiálního a vertikálního proudění

Obr. 3.1 Schéma proudění pórové vody k vertikálnímu drénu [5, upr.]

Konsolidace vychází z Terzaghiho rovnice pro jednoosou konsolidaci ve vertikálním směru, kde je obecně platný Hookův zákon. Pro výpočet je nutné splnit základní předpoklady dle Barrona – zemina je plně nasycená vodou ($S_r = 1$), zrna skeletu jsou nestlačitelná, koeficient filtrace k a součinitel konsolidace c_v jsou konstantní pro celou vrstvu, proudění vody se řídí Darcyho zákonem a deformace pevné fáze je způsobena především efektivním napětím [5]. Je dána vztahem:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = c_v \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (3.1)$$

kde: u – pórový tlak [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]

z – poloha analyzovaného bodu ve vrstvě [m]

t – čas [s]

c_v - součinitel konsolidace ve vertikálním směru [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Pro výpočet sedání základové půdy je potřeba znát deformační charakteristiky zemin, které určujeme z jednoosé stlačitelnosti v přístroji zvaném edometr. Při edometrické zkoušce je vzorek zeminy umístěn do kovového prstence, kde je vodorovná deformace rovna nule. Na vzorek je ve zvoleném časovém intervalu aplikováno svislé konsolidační napětí, které se

postupně zvyšuje (např. 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 a 0,5 MPa) a zemina se tak deformuje (konsoliduje). Výsledkem této zkoušky je křivka závislosti deformace a napětí, jejíž sečnu charakterizuje edometrický modul přetvárnosti E_{oed} [MPa] a je dán vztahem [6]:

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma_{ef}}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{ef,2} - \sigma_{ef,1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.2)$$

kde: σ – napětí [MPa]

ε – poměrná deformace [%]

Součinitel konsolidace c_v [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] závislý na vlastnostech zeminy se určuje z edometrické zkoušky [29]:

$$c_v = \frac{E_{oed} \cdot k}{\gamma_w} \quad (3.3)$$

kde: E_{oed} – edometrický modul přetvárnosti [MPa]

k – koeficient filtrace [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

γ_w – objemová tíha vody [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$]

Pro výpočet sedání v čase v podloží jílovité zeminy je potřeba stanovit hodnotu součinitele jednoosé konsolidace c_v pomocí Cassagrandeho logaritmické metody, kde je logaritmická křivka závislá na poměru stlačení vzorku edometru s [mm] a celkového času t [min] nebo pomocí Taylorovy odmocninové metody, kde je výsledná křivka závislá na poměru stlačení s [mm] a odmocnině času \sqrt{t} [min]. Celkový čas t [min] potřebný k dosažení požadovaného stupně konsolidace je dán vztahem [6]:

$$t = \frac{T \cdot h^2}{c_v} \quad (3.4)$$

kde: c_v – součinitel konsolidace [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

h – nejdelší drenážní dráha zkušební vzorku [mm]. Pro oboustranně drénované vrstvy je h rovno polovině tloušťky drénované vrstvy, pro jednostrannou drenáž je h rovno skutečné tloušťce.

T – časový faktor [-], který se určuje z grafu v závislosti na stupni konsolidace U [%]. Z něj zjistíme procentuální podíl pevné složky a vody na vnější zatížení.

Popis následujících aplikovaných vzorců bude podrobněji rozveden v kapitole 4.2.2, v této části se na následujícím příkladu pouze ukáže, jak velký vliv má instalace vertikálních drénů na celkovou dobu konsolidace. Počítejme s časovým faktorem pro 90% konsolidaci $T = 0,848$ za předpokladu, že součinitel konsolidace pro měkké jíly je roven $c_h = 2 \text{ m}^2/\text{rok}$ [7].

$$t = \frac{T_{90} \cdot h^2}{c_h} = \frac{0,848 \cdot 10^2}{2} = 42,4 \text{ let} \quad (3.5)$$

S využitím prefabrikovaných vertikálních drénů Colbondrain CX1000 s trojúhelníkovou roztečí 1,6 m [7], tloušťkou 3,6 mm a šířkou 100 mm [8], vychází ekvivalentní průměr PVD d [mm] z rovnice:

$$d = \frac{2b}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{b}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ mm} \quad (3.6)$$

kde: b – šířka drénu [mm]

$f = \frac{\pi}{4}$ – korekční faktor [-]

Průměr odtokového válce D [m] pro trojúhelníkovou síť je roven:

$$D = 1,05 \cdot S = 1,05 \cdot 1,6 = 1,68 \text{ m} \quad (3.7)$$

kde: S – délka strany trojúhelníka [m].

Celkový čas konsolidace t dle Kjellmanova vzorce je dán vztahem:

$$t = \frac{D^2}{8c_h} \cdot \left[\ln \frac{D}{d} - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1 - U_h} = \frac{1,68^2}{8 \cdot 2} \cdot \left[\ln \frac{1,68}{0,050} - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1 - 0,848} = 0,919 \text{ roku} \\ \approx 11 \text{ měsíců} \quad (3.8)$$

kde: D – průměr odtokového válce zeminy pro trojúhelníkovou síť [m]

c_h – součinitel konsolidace zeminy při horizontálním směru odvodnění [m^2/rok]

d – ekvivalentní průměr geodrénu pro Colbondrain CX1000 = 1/2 šířky drénu [m]

U_h – požadovaný stupeň konsolidace [-]

Z výsledků si můžeme odvodit, že aplikace prefabrikovaných vertikálních drénů nám výrazně sníží celkový čas konsolidačního procesu ze 42,4 let na pouhých 11 měsíců.

4 Typy vertikálních drénů

Vertikální drény jsou rozmístěny systematicky, náhodně, řadově či kombinovaně. Prakticky rozlišujeme dva základní typy drenáže.

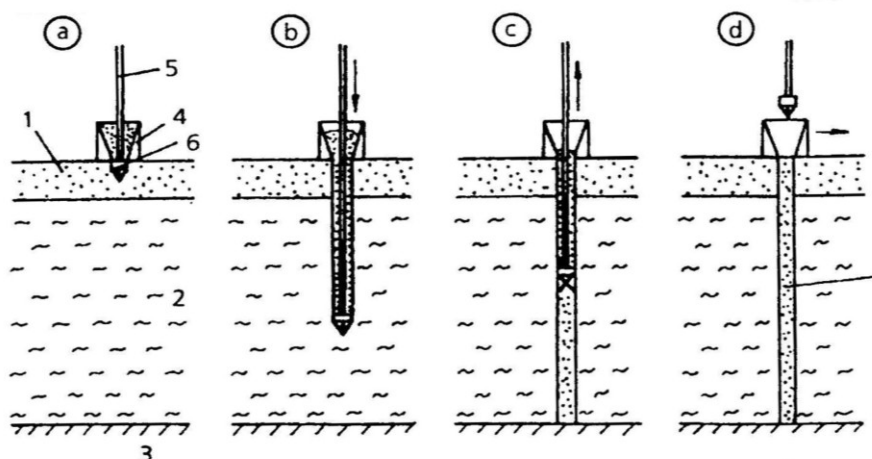
4.1 Pískové drény

Pískové drény byly velmi používaným typem vertikální drenáže po dobu 50 let. První jejich rozumné využití bylo provedeno v Kalifornii v 30. letech 20. století. Zahrnují jednoduchý proces, kdy v soudržné zemině do hloubky stanovené hydrologickým průzkumem vyhloubíme kruhovou jámu v průměru 0,18–0,45 m [9, s. 110].

Prakticky existují tři konstrukční metody jak instalovat pískové vertikální drény – vysokotlaké tryskání vodou, ražení či vrtání s proplachem. Všechny tyto metody se provádějí přímo na stavbě, kde je do zeminy vtlačena ocelová trn a poté je vytahován zároveň s vyplňováním otvoru pískem. Vzhledem k tomu, že je písek tvořen částicemi o velikosti 0,06–2 mm, jeho propustnost je mnohem vyšší než okolní jíl, takže voda proudí k povrchu mnohem snadněji [9, s. 110].

Vysokotlaké tryskání vodou zajišťuje proudění vody ocelovou tryskou rychlostí vyšší než 50 l/sek. Vodní paprsek naráží na dno vznikající díry, rozvolňuje zeminu a protéká kolem trysky směrem k ústí. Ocelový trn se tak vlastní váhou zaráží hlouběji do zeminy. Tato metoda vyžaduje velké množství vody a vytváří problém, jak zneškodnit vznikající kal, což je v rozporu s ochranou životního prostředí. Výhodou je velmi malé rozrušení zeminy. [9, s. 110].

U ražené metody se trn skládá z ocelové trubky zajištěné na spodním konci uzávěrem. Trn je vháněn beraněním, vibrací nebo vplachováním do zeminy. Když trubka dosáhne požadované hloubky, písek a voda se vtlačí dovnitř a trubka je následně vytažena. Vzhledem k tomu, že se trn během instalace pohybuje všemi směry, dochází k porušení zeminy smykem či stlačením. To způsobuje vysoký počáteční pórový tlak, nízkou permeabilitu podél vrtu a snížení smykové pevnosti. Nicméně je to jednoduchá, rychlá a levná metoda, díky čemuž je také populární [9, s. 110].



1 – filtrační vrstva, 2 – neúnosná zemina, 3 – únosná zemina, 4 – zásobník s pískem, 5 – vodící tyč, 6 – otvíratelný uzávěr, 7 – hotová písková pilota

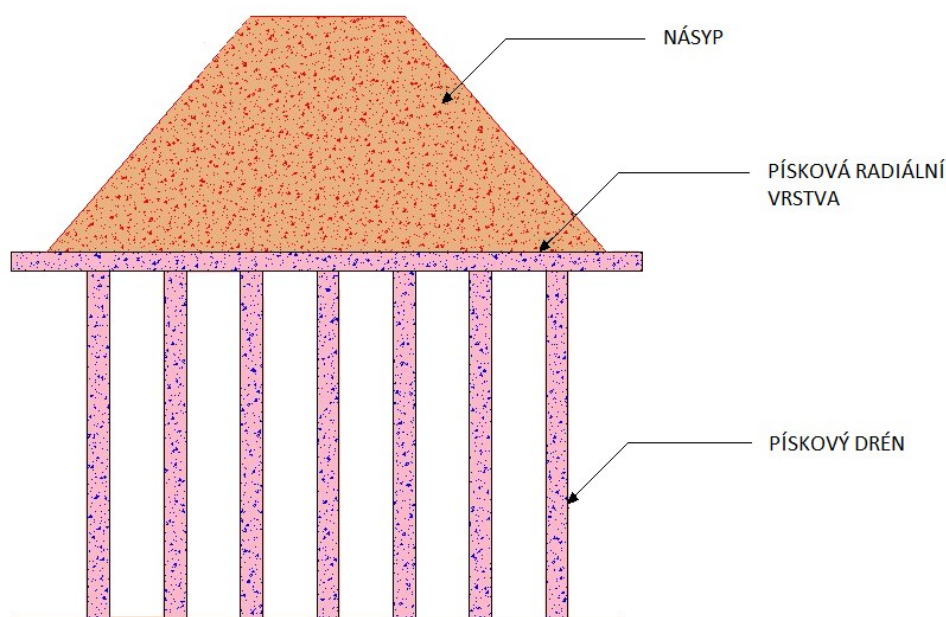
Obr. 4.1.1 Instalace pískové piloty vibračním zarážením [27]

U metody vrtání s proplachem je voda odváděna prostřednictvím cirkulačního systému na čelbu vrtu rychlostí 1–2 l/sek. Zde vychází z vrtného nástroje, chladí ho, zbavuje čelbu rozpojených kusů horniny a proudí zpět k ústí vrtu, přičemž s sebou unáší směs vody a horninové drti. Díky sítům a různým filtračním zařízením se získá zpět čistá voda, která se opět stane součástí oběhu. Metoda, která je prováděna jednoduchými stroji, způsobuje menší narušení zeminy. Na druhou stranu je pomalá a vhodná především pro menší projekty.

Písek užitý pro výplň vrtů by neměl obsahovat jemnozrnný materiál, jeho částice by měly mít stejnou velikost (být uniformní) a zároveň by neměly přesahovat 4 mm. Písek by měl být dostatečně propustný, aby umožnil nerušený tok vody horizontálním směrem k drénu i vertikálním směrem k ústí vrtu [9, s. 111].

Pískové drény mohou být rozmístěny ve čtvercovém či trojúhelníkovém rastru. Vzdálenost s mezi jednotlivými drény musí být menší, než je tloušťka násypu $2h$, aby se snížila délka drenážní dráhy. Drenážní zóna každého drénu v trojúhelníkovém rastru má tvar šestiúhelníku, který lze aproximovat na kruh o poloměru r , kde $r = 0,525 s$. V případě čtvercového vzoru je poloměr kruhu roven $r = 0,554 s$. Běžně se rozteč pohybuje mezi 2,5 a 5 m [10].

Na horní část pískových drénů může být umístěna písková radiální vrstva, která shromažďuje veškerou odváděnou vodu, která je pak sváděna mimo drénované území. Pro urychlení odvodnění je na tuto vrstvu umístěn násyp z přebytečných materiálů.



Obr. 4.1.2 Schéma konstrukce pískových drénů [10, upr.]

Nevýhoda pískových drénů je zřejmá. Těžko dostupné materiály s vysokými nároky na požadované vlastnosti, pomalá, technologicky náročná instalace či porušení okolní zeminy. Během vyplňování vrtu pískem může dojít ke zvětšení jeho objemu, čímž se vytvoří dutiny v okolní zemině, které mohou mít za následek zhroucení celé konstrukce v důsledku pozdějšího zaplavení. Při předimenzování průměru pískového drénu mohou vznikat konstrukční problémy a celý proces realizace je finančně náročný. Proto se v dnešní době od pískových drénů upustilo a písek nahradil levnější a efektivnější materiál - plast.

4.2 Páskové geokompozitní drény (PVD drény)

Páskové geokompozitní drény či prefabrikované vertikální drény (PVD) jsou nejpoužívanějším typem vertikálních drénů. Samostatně plní drenážní funkci a urychlují tak konsolidaci neúnosného, stlačitelného, jílovitého podloží. V základě drén obsahuje jádro, které je profilované tak, aby jeho drážky mohly odvádět pórovou vodu směrem k povrchu. Je vyráběné z polypropylenu nebo polyetyleny a může být značně elastické. Také je odolné vůči agresivním látkám a organismům. Jádro je obalené tkanou či netkanou geotextilií, která slouží jako filtr mezi jádrem a okolní zeminou. Tyto dvě součásti každého PVD jsou nejčastěji spojovány tepelně, lepením nebo sešitím.

Následující kapitola bude pojednávat o tomto typu drenáže, o jeho návrhu, vlastnostech či aplikaci.

4.2.1 Historie

Počátek rozvoje prefabrikovaných vertikálních drénů je datován na 40. léta 20. století, kdy ředitel švédského geotechnického institutu Walter Kjellman vypracoval návrh prefabrikovaného páskového vertikálního drénu vytvořeného z kartonového jádra obaleného papírovým filtrem, který byl mechanicky zatlačován do zeminy. Kartonové jádro později nahradilo jádro plastové a tento typ byl v Evropě hojně využíván do roku 1970. O deset let později odolnější, spolehlivější a cenově výhodnější plastové vertikální drény již zcela nahradily drény pískové, především pro svou rychlejší instalaci a technickou nenáročnost [11].

4.2.2 Návrh

Účinnému návrhu vertikálních drénů předchází geotechnický průzkum. Nejprve se vizuálně zkontroluje povrch dané lokality. Odhalí se tak přítomnost balvanů, kořenů či zpevněných vrstev, které by měly negativní vliv na instalaci drenáže. Zjistí se geologický profil podloží a veškeré zeminové vlastnosti, které se dále aplikují do rovnic a počítačových softwarů, jež pomohou stanovit přesný návrh vertikálního drénu [5].

Mezi hlavní vlastnosti zeminy patří součinitel konsolidace v horizontálním C_h i vertikálním směru C_v . Ten se dle Barronovy a Terzaghiho teorie předpokládá konstantní. V praxi však není. Je ovlivněn mnoha faktory jako geostatická napjatost a zrnitost. Pro správný výpočet je nutné stanovit vztah mezi součinitelem konsolidace a napjatostí [12, s. 100].

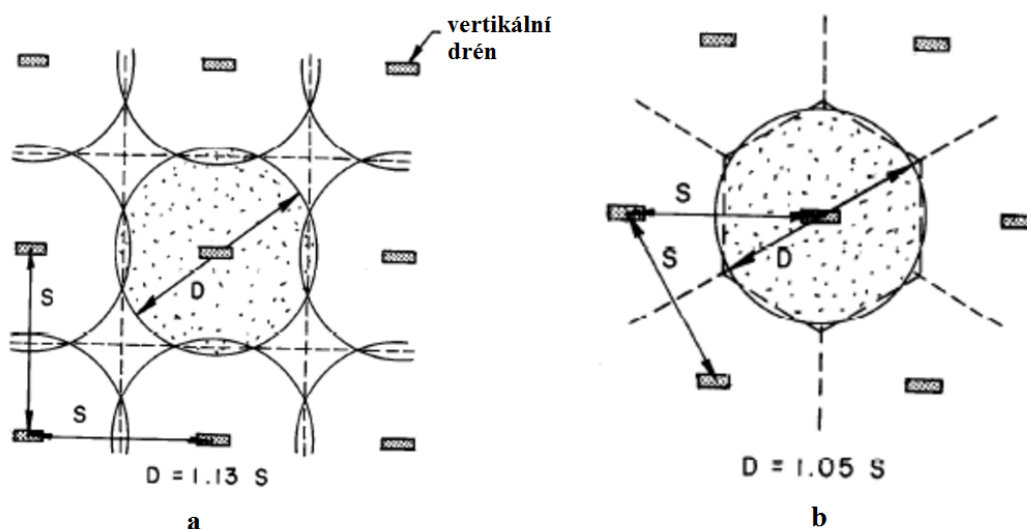
Další klíčovou vlastností zeminového prostředí je koeficient filtrace v horizontálním k_h a vertikálním směru k_v . Má největší rozptyl ze všech vlastností zeminy (10^{-11} m.s⁻¹ pro měkké zeminy až 10^{-3} m.s⁻¹ pro štěrky a písky), proto jeho stanovení není snadné. Během procesu konsolidace se navíc jeho hodnota neustále mění. Chyba v jeho stanovení pak přímo ovlivní celkový čas na dosažení požadovaného stupně konsolidace v závislosti na Terzaghiho teorii. Pro správný výpočet je nutné stanovit vztah mezi koeficientem filtrace a pórovitostí [12, s. 100].

Další podstatnou vlastností zemin je stupeň překonsolidace OCR, průměr tzv. smear zóny d_s , součinitel stlačitelnosti C_e , neodvodněná pevnost ve smyku C_u a neodvodněný Youngův modul E_u [12, s. 102].

Řádný průzkum by neměl pouze stanovit vlastnosti zeminy, ale také by měl porozumět jejich vzájemným vztahům. Optimální návrh vertikálních drenů vyžaduje velmi přesné hodnoty získané z laboratorních zkoušek, zkoušek in-situ či výpočtů na základě vlastností zeminového prostředí.

Laboratorní přístroje, jako edometry či různé konsolidometry, stanovují především geostatickou napjatost, stlačitelnost a součinitel konsolidace a jsou časově náročné. Naopak zkoušky in-situ, především disipační zkoušky (CPTU), presiometrické zkoušky (SBPM) a zkoušky pomocí dilatometrů (DMT) jsou snadno a rychle proveditelné. Proto jsou stále používanější na území České Republiky. Výpočet na základě vlastností zeminy slouží především jako dobrá kontrola pro předchozí metody [12, s. 102–104].

Pro správnou funkci vertikálních drenů je nutné stanovit potřebnou hloubku pro odvodnění a průměr odtokového válce daného drenu D [m]. Drény se rozmisťují v trojúhelníkovém ($D = 1,05 S$) nebo čtvercovém rastru ($D = 1,128 S$), kde S je jejich vzájemná vzdálenost. Použití trojúhelníkové sítě pro instalaci vertikálních drenů poskytuje nejúčinnější možnou variantu, která určuje vztah mezi plochou rovnostranného trojúhelníka o délce strany S a odtokovou kruhovou plochou [11].



Obr. 4.2.2.1 Schéma návrhu PVD drenů s a) čtvercovou sítí; b) trojúhelníkovou sítí [10]

Celkový čas konsolidace pro dosažení požadovaného stupně konsolidace dle metody popsané profesorem Kjellmanem v roce 1948 je dán následující rovnicí:

$$t = \frac{D^2}{8 C_h} \cdot \left[\ln \frac{D}{d} - \frac{3}{4} \right] \cdot \ln \frac{1}{1 - U_h} \quad (4.2.2.1)$$

kde: t – celkový čas konsolidace [rok]

D – průměr odtokového válce zeminy [m]

c_h – součinitel konsolidace zeminy při vertikálním směru odvodnění [m^2/rok]

d – ekvivalentní průměr geodrénu [m]

U_h – požadovaný stupeň konsolidace [-]

Jak je možné z rovnice zjistit, návrh závisí na několika parametrech. Jedním z nich je ekvivalentní průměr geodrénu d [m], který je závislý na opravném součiniteli f [-] a šířce PVD b [m]. Součinitel f zohledňuje například méně příznivý přítok do drénu vzniklý porušením během instalace [7].

$$f = \frac{\pi}{4}$$

$$d = \frac{2b}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{b}{2} \quad (4.2.2.2)$$

Podstatné je také stanovení celkového průběhu sedání, který je způsoben objemovými změnami v zemině v důsledku vytlačení veškeré pórové vody. Metoda stanovení je v podstatě stejná jako v klasických případech bez aplikace vertikálních drénů. Může se stanovit pomocí jednorozměrné analýzy a parametry se určí laboratorní zkouškou [13]. Konečná hodnota stlačení s [m] vrstvy i o mocnosti h zeminové vrstvy je dána vztahem:

$$s_i = \sum \frac{\sigma_{z,i} \cdot h_i}{E_{oed,i}} \quad (4.2.2.3)$$

kde: $\sigma_{z,i}$ – svislá složka napětí ve středu i -té vrstvy [MPa]

h – mocnost i -té vrstvy [m]

$E_{oed,i}$ – edometrický modul i -té vrstvy [MPa]






Vertikální drény jsou pro účely konsolidace zeminy nejčastěji kombinovány s násypem. Proto je nutné navrhnout násyp s vhodnou geometrií, rozměry a materiálem.

4.2.3 Typy PVD

PVD mají různé vlastnosti i rozměry, které se odvíjejí od výrobce a zeminových podmínek. Typický rozměr je však standardizován na 100 mm šířky a 3–6 mm tloušťky. V podstatě rozlišujeme tři základní typy PVD [12, s. 106].

První je páskový drén s jádrem odděleným od geotextilie. Druhým typem je integrovaný drén s jádrem připevněným k filtru. Ten poskytuje daleko vyšší průtokovou kapacitu a odolává vyššímu napětí v tahu. Třetím typem je kruhový drén, který má lepší odolnost vůči ohybu a bývá přednostně používán pro vakuovou konsolidaci [12, s. 106,107].

Kromě těchto běžných variant existují i varianty netradiční, např. elektrické vertikální drény s vloženými kovovými fóliemi, které pracují na principu elektroosmózy. Elektromagnetické pole vytvořené pomocí katod a anod ovlivňuje chování vodních roztoků v zemině. V poslední době dochází k rozvoji ekologické geodrenáže, která využívá biologicky rozložitelných materiálů [12, s. 107].

OBCHODNÍ NÁZEV	CHEMICAL BOARD	CASTLE BOARD	PVC DRAIN	ALIDRAIN	GEO DRAIN
TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU					

Obr. 4.2.3.1 Tvary příčného řezu jádra PVD [27]

Výrobci prefabrikovaných vertikálních drénů se liší především tvarem zvoleného jádra a typem geotextilie, což ovlivní faktory jako elasticitu či aplikovatelnou hloubku. Jedním z nejpoužívanějších typů jsou drény Mebradrain. Po celém světě již bylo instalováno více než 200 milionů metrů. Výhodou systému je malé porušení vrstev, oddrénování prostředí i při vysokém tlaku zeminy, vysoká rychlost instalace a aplikovatelná hloubka až 60 m. Je dodáván ve 4 typech. MD 7407 a MD 7007 jsou vhodné pro projekty s nízkými nároky na drenážní hloubku (25 m) a poměr stlačitelnosti (do 20 %). MD 88 a MD 88M jsou naopak vhodné do hloubky 60 m při poměru stlačitelnosti do 50 % [4].

Dalším typem vertikálních drénů jsou geodrény Colbondrain vyráběné firmou Colbond Geosynthetics. Je to kompozit polyesterového jádra obaleného polyesterovou netkanou

geotextilií. Drenážní jádro poskytuje vysokou propustnost a je odolné vůči velkým tlakům a ohybům, ke kterým dochází při sedání. Aplikovatelná hloubka je více než 50 m [2, s. 1].

AMERDRAIN-W je dalším výrobcem PVD drénů. Využívá pevnou a propustnou netkanou filtrační textilií z 100% propylenu vhodnou pro účely odvodnění. Filtr je odolný vůči plísním, hnilobám, hmyzu a chemikáliím běžně se vyskytujících v zemině. Je tvarově stabilní ve vlhkých i suchých podmínkách a má vysoký odpor proti propíchnutí a roztržení. Jádro je tuhý konstrukční prvek extrudovaný na 100% polypropylen. Má celkem 38 podélných drážek nacházejících se na obou stranách. Jádro je rozměrově stabilní v mokrých i suchých podmínkách a má dobrý odpor proti deformacím a propíchnutí [14].

Tyto tři uvedené typy představují v podstatě zlomek všech existujících typů vertikálních drénů. Díky neustálému rozvoji této technologie se počet firem vyrábějících PVD neustále zvyšuje. Popisovat postupně jednotlivé typy je nesmyslné, rozdíly jsou minimální a každý stát preferuje drén, který se vyrábí na jejich území.

4.2.4 Vlastnosti

V současné době existuje nepřehledné množství firem vyrábějících PVD, jejichž produkty mají různé vlastnosti. Při výběru jsou podstatné nejen celkové náklady, ale také zda vlastnosti budou vyhovovat dané zemině a potřebám projektu. Geotechnik je odpovědný za ověření veškerých technických informací, které výrobce daného drénu uvádí.

Drény se odlišují také zvolenými zkouškami stanovující parametry testovaného drénu. Jeden výrobce může preferovat odlišnou metodu než ten druhý, proto tyto vlastnosti nelze přímo srovnávat. Geotechnik by se měl přesvědčit o specifikacích na základě provádění nezávislých zkoušek kvality výrobku.

Také bývá obvyklé, že pro projekty odvodnění zeminového podloží bývá použito až několik tisíc vertikálních drénů, které jsou dodávány na pracoviště po dobu několika měsíců či let. Kvalita drénů v takovém časovém intervalu nemusí být konstantní, a proto by měla být kontrolována v každé šarži [16].

Pro správnou funkci musí PVD splňovat určité požadavky, aby dostatečně zajistili odtok vody z drénované oblasti. Ty jsou dány základními vlastnostmi, které jsou uvedeny v dalších kapitolách.

4.2.4.1 Průtokové množství (drenážní kapacita)

Průtokové množství neboli drenážní kapacita je stěžejním kritériem pro volbu PVD. Účelem PVD je odčerpát vodu a uvolnit tak pórový tlak. Proto čím vyšší je průtokové množství, tím lépe drén vede vodu a tím vyšší je i celkový odtok.

Průtokové množství je ovlivňováno mnoha faktory. Jedním z nich je přírůstek konsolidačního napětí v důsledku vnějšího zatížení, čímž hrozí ohýbání a deformace drénu. Pro výpočet průtokového množství je dobré znát při daných podmínkách hodnoty pro přímý i pro deformovaný drén. Zdeformovaný drén bude mít obvykle menší hodnotu průtokového množství. Ta se také mění s časem. Čas ovlivní pozvolné dotvarování drenážního materiálu za studena při dlouhodobém zatížení (creep), což způsobí zmenšení účinného průřezu a tím i snížení průtokového množství. Další možností negativního vlivu na výslednou hodnotu je zanášení drénu. Pokud jsou póry filtru příliš velké, může jemnozrný materiál prostoupit do jádra, čímž dojde k jeho zanesení či ucpaní. V posledním případě průtokové množství klesá s rostoucím hydraulickým gradientem nebo nižší teplotou okolního prostředí [16].

Drenážní kapacita drénu je charakterizována prouděním v rovině drénu při daném spádu a zatížení. Vychází z teorie Darcyho zákona a je dána rovnicí:

$$q_w = \frac{Q}{i} \quad (4.2.4.1.1)$$

kde: q_w – průtokové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q – rychlost proudění [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 i – hydraulický gradient [-]

Rychlost proudění Q je poté rovna:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (4.2.4.1.2)$$

kde: k – koeficient filtrace [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 A – průřezová plocha drénu [m^2]

Průtokové množství by mělo dosahovat vyšších hodnot než odpor drénu. Pokud jsou hodnoty menší, tzn. množství vody, které je nutné odčerpát, nedosahuje požadovaného stupně, je třeba do výsledku započítat i odpor drénu. Ten lze zhodnotit za použití průtokového faktoru D , který je definován v závislosti na zvolené teorii. Pro možnost zanedbání odporu drénu musí být splněna tato podmínka [12, s. 109]:

$$D = \frac{q_w}{k_h \cdot l_m^2} \geq 7,85 \quad (4.2.4.1.3)$$

kde: D – faktor odporu drénu [-]

q_w – průtokové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

k_h – koeficient filtrace v horizontálním směru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

l_m – délka drenážní dráhy [m]

Z rovnice je zřejmé, že čím větší je propustnost zeminy a délka drenážní dráhy, tím je vyžadován i větší průtokový faktor. Z toho si můžeme odvodit, že požadované průtokové množství, které zohledňuje všechny faktory, má tvar rovnice:

$$q_{req} \geq 7,85 \cdot F_s \cdot k_h \cdot l_m^2 \quad (4.2.4.1.4)$$

kde: q_{req} – požadované průtokové množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

F_s – redukční faktor (4-6)

k_h – koeficient filtrace v horizontálním směru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

l_m – délka drenážní dráhy [m]

Redukční faktor neboli míra bezpečnosti návrhu prefabrikovaného drénu je závislá na trvanlivosti konstrukce. Pro dlouhodobou funkci nabírá hodnot 4-6, pro funkci krátkodobou pouze 2-3. Průtokové množství se snižuje s deformací a časem, ale zároveň se snižuje i propustnost zeminy s rostoucí konsolidací, proto není nutné použití vysokého redukčního faktoru. [16].

V dnešní době většina drénů poskytuje dostatečnou hodnotu průtokového množství i při zdeformovaném stavu. Ta se pohybuje zpravidla od $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $90 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ve srovnání s pískovým drénem o průměru 350 mm, který vykazuje hodnotu průtokového množství $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, je výrazně účinnější [7].

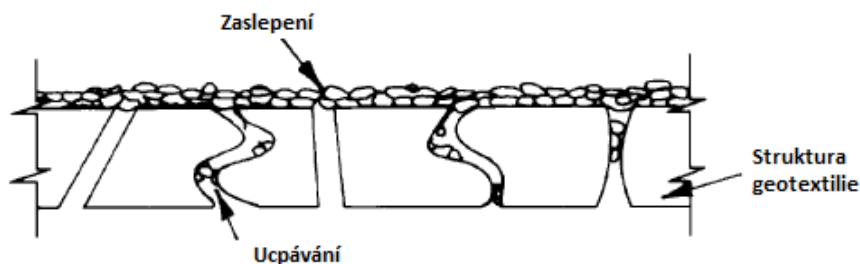
4.2.4.2 Vlastnosti filtru

Drenážní geokompozity jsou převážně tvořeny jádrem obaleným geotextilním pláštěm, který filtruje okolní zeminu. Existují však i monolitické typy PVD, kde k filtraci dochází pomocí děr na povrchu jádra nebo přirozenou propustností drenážního materiálu [17, s. 64].

Důležitými aspekty při výběru vhodné geotextilie je její konstrukce, rozsah velikosti otvorů v její struktuře (AOS) a zrnitostní skladba a typ obklopující zeminy. Geotextilní filtr je poměrně tenký a to z důvodu, že jeho tloušťka má minimální vliv na drenážní vlastnosti. Mnohem podstatnější je AOS dané geotextilie, které musí být dostatečně velké, aby zabránilo průchodu částicím zeminy a to především jemnozrnnému materiálu, který může značně redukovat průtokovou kapacitu drénu [15].

Princip filtrace u tkaných geotextilií, které mají póry prakticky uniformní, spočívá v odplavení menších zrn a následném zadržení zrn větších. Na ta se nabaluje jemnozrnný materiál, čímž se vytváří přirozený zeminový filtr. K ucpání tak prakticky nedochází. Jsou vhodná především pro šterkové a písčité zeminy [3, s. 2].

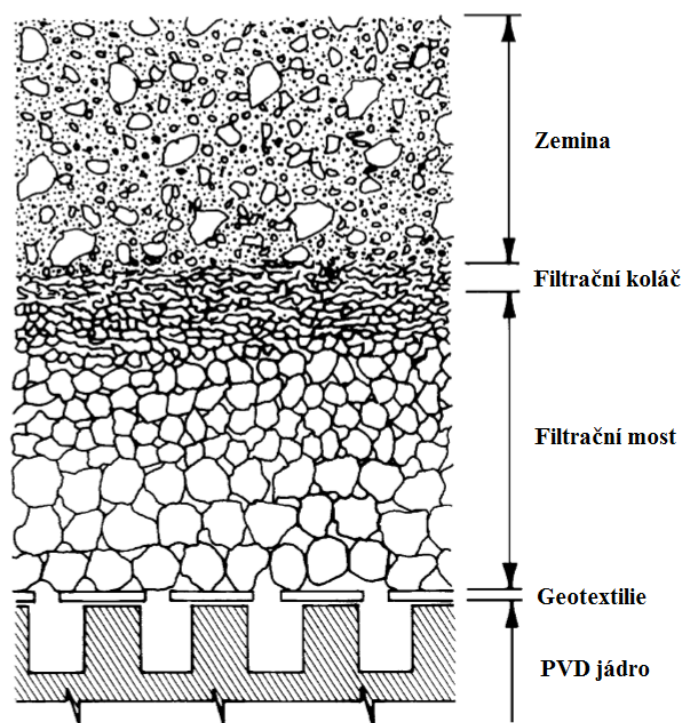
Geotextilie, které se obvykle používají pro prefabrikované vertikální drény, jsou netkané a mají nestejnou velikost otvorů ve struktuře. Zde může dojít k ucpávání či zaslepení. Při ucpání filtru musí částice zeminy urazit poměrně dlouhou a klikatou dráhu a snáze se tak usadí ve struktuře tkaniny, čímž omezí výslednou propustnost. Při tzv. zaslepení je částicím zeminy zabráněno k průchodu geotextilií a na povrchu se vytvoří filtrační koláč, který výrazně snižuje výslednou permeabilitu [17, s. 64].



Obr. 4.2.4.2.1 Způsoby omezení permeability filtru [17, s. 64, upr.]

Princip vytvoření přirozeného zeminového filtru spočívá v migraci malých částic zeminy geotextilií a následnému usazení velkých částic na povrchu, které vymezují vrstvu zvanou filtrační most. Vrstva jemnozrnného materiálu bezprostředně za filtračním mostem se nazývá filtrační koláč a výrazně omezuje výslednou propustnost. Geotextilní filtr se tak chová

jako katalyzátor a iniciuje k vytvoření účinného zeminového filtru. Pokud již nedochází k dalšímu průchodu drobných částic, je zemino-geotextilní systém v rovnováze [17, s. 64,65].



Obr. 4.2.4.2.2 Filtrace částic zeminy v okolí drénu [17, s. 65, upr.]

Vytvoření stabilních a filtračních podmínek v zemině obklopující drén je dáno fyzikálními a mechanickými vlastnostmi daného filtru (rozsah velikosti pórů ve struktuře, poróznost, tloušťka, stlačitelnost, propustnost), vlastnostmi přiléhající zeminy (zrnitost, pórovitost, propustnost, soudržnost), vnějším zatížením (stálé, provozní) a hydraulickými podmínkami (typ proudění, směr proudění) [17, s. 65, 66].

Propustnost neboli permeabilita je schopnost filtru propouštět vodu kolmo na rovinu. Měření průtočného množství Q [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a hydraulického gradientu i [-] umožňuje stanovit koeficient propustnosti k [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] [18, s. 54]:

$$K_n = \frac{Q}{i} \quad (4.2.4.2.1)$$

Hydraulický gradient i je pak stanoven následovně:

$$i = \frac{\Delta H}{t_g} \quad (4.2.4.2.2)$$

kde: ΔH – rozdíl výšek [m]

t_g – tloušťka geotextilie [m]

Propustnost je značně ovlivňována strukturou geotextilie. Nejdůležitějším požadavkem je, že součinitel propustnosti filtru k_f musí být a po celou dobu fungování PVD musí zůstat větší než součinitel propustnosti obklopující zeminy k_z , aby se nesnižovala průtočnost dané zeminy [18, s. 29].

V současné době není problém požadavek splnit i ve složitých podmínkách, kde by měla být propustnost až desetinásobná. Například v situacích, kdy jsou PVD instalovány ve velmi hlubokých ložiscích jílu s pískovými mezivrstvami, které slouží jako horizontální drenáž. Méně propustná geotextilie by v téhle situaci měla nežádoucí vliv na ztrátu tlaku [17, s. 64].

Výrobci poskytují veřejnosti kvalitní filtry, které mají permeabilitu vyšší než 10^{-4} m.s^{-1} . Pokud to není žádoucí, je zbytečné používat tak vysoké hodnoty. Tloušťka filtru je dalším parametrem ovlivňující průtokové množství daného drénu. Udává se v poměru hmotnosti k ploše a měla by být vyšší než 90 g.m^{-2} [12, s. 112].

Další vlastností filtru je transmisivita neboli odvodňovací kapacita geotextilie, tzn. schopnost filtru určité tloušťky propouštět vodu v celé ploše při jednotkovém hydraulickém spádu. Je ovlivněna ucpáváním a tlakem zeminy [18, s. 56].

$$\Theta = k_p \cdot t_g \quad (4.2.4.2.3)$$

kde: θ – transmisivita geotextilie [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]

k_p – koeficient permeability v rovině řezu [m.s^{-1}]

t_g – tloušťka geotextilie [m]

Podobnou vlastností je i peritivita. Rozdíl spočívá v tom, že permeabilita je směřována kolmo na vertikální drén a umožňuje srovnávat geotextilie různých tloušťek [18, s. 56].

$$\Psi = \frac{k_n}{t_g} \quad (4.2.4.2.4)$$

kde: ψ – peritivita geotextilie [s^{-1}]

k_n – koeficient permeability kolmo na rovinu řezu [m.s^{-1}]

t_g – tloušťka geotextilie [m]

Výkon PVD je velmi ovlivňován vlastnostmi obklopující zeminy. Teplota by měla být maximálně 25°C a pH by se mělo pohybovat v rozmezí 4–9 [5]. Zrnitostní složení zeminy,

především podíl drobných částic, které jsou unášeny vytlačovanou pórovou vodou a které se hromadí uvnitř nebo na povrchu pláště, velmi ovlivňuje celkovou hodnotu průtokového množství. Efekt transmise drobných částic je znám jako piping. Ten způsobuje kromě zanášení drénu také deformace v podzákladí [3, s. 1].

Zemino-geotextilní vlastnosti jsou založeny na empirickém vztahu velikosti otvorů ve struktuře filtru (AOS) a velikosti částic zeminy. Velikost pórů tkaniny musí být dostatečně malá, aby zabránila zanesení drénu jemnozrnným materiálem. Naopak musí být natolik velká, aby filtr mohl poskytovat dostatečnou propustnost. Musí tedy splňovat určitá kritéria, která jsou dána typem geotextilie a zdrojem navrhovaného kritéria, a která jsou uvedena v tabulce 4.2.4.2.1 [15].

AOS je obvykle definována jako velikost daného otvoru tkaniny většího než 95, 90, 50, 10 % otvorů ve struktuře tkaniny. Dle procentuálního podílu značíme O_{95} , O_{90} , O_{50} , O_{10} [17, s. 67]. V Evropě a Kanadě je tato vlastnost pojmenována FOS a může sloužit jako alternativa. Rozdíl mezi oběma metodami je ve stanovení. AOS se měří suchým proséváním a FOS vlhkým a hydrodynamickým proséváním [15].

D_{85} , D_{50} , D_{15} znamená, že 85, 50, 15 % částic zeminy je menších než průměr zkoumané částice. Kromě toho musí vzorek geotextilie úspěšně projít filtračním testem. Pro zeminu s $k_f > 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ se jedná o gradientovou analýzu, jejíž výsledná hodnota musí být menší než 3. Pro zeminu s $k_f < 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ je zapotřebí dlouhodobý filtrační test [17, s. 67].

Tab. 4.2.4.2.1 Přehled filtračních podmínek pro geotextilní filtry

Zdroj	Podmínka	Poznámka
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$	Geotextilie s vysokým podílem velkých otvorů ve struktuře
Ogink (1975)	$O_{90}/D_{90} \leq 1,8$	Netkané geotextilie
Sweetland (1977)	$O_{15}/D_{85} \leq 1$	Netkané geotextilie Zeminy s $C_u=1,5$ nebo $C_u=4$
Rankilor (1981)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$ $O_{50}/D_{50} \leq 25 \sim 37$ $O_{15}/D_{15} \leq 1$	Netkané geotextilie, Zeminy s $0,02 \leq D_{85} < 0,25 \text{ mm}$ Netkané geotextilie, soudržné zeminy Netkané geotextilie, Zeminy s $D_{85} > 0,25 \text{ mm}$
Carroll (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2 \sim 3$	Netkané i tkané geotextilie
Christopher a Holtz (1985)	$O_{95} \leq 1,85 D_{85}$ Pro ustálený stav: $AOS \leq 0,3 D_{85}$	Netkané geotextilie Zeminy, kdy 50 % částic prošlo pláštěm o velikosti $75 \mu\text{m}$
Chen a Chen (1986)	$O_{90}/D_{85} \leq 1,2 \sim 1,8$ $O_{90}/D_{50} \leq 10 \sim 12$	
Holtz a Christopher (1987)	Pro ustálený stav: $O_{95} \leq 0,5$ $D_{85} \leq 0,3 \text{ mm}$ Pro dynamické proudění $O_{50} \leq 0,5 D_{85}$	Netkané geotextilie Prach, jíl

Je důležité připomenout, že se geotextilie musí chovat jako překážka v zemině vhodná k tvorbě přírodního filtru. V minulosti se provedlo několik filtračních testů s cílem zjistit schopnost filtru zadržet částice zeminy. Bylo zjištěno, že retenční schopnost a odolnost proti zanášení geotextilie jsou převážně závislé na velikostech otvorů ve struktuře filtru. Rozeznáváme prakticky tři druhy přírodních filtrací [17, s. 68].

Pokud jsou částice zeminy větší než otvory v geotextilii, tak na jejím povrchu vznikne filtrační koláč. Tento přechodný filtr obvykle zabraňuje průtoku vody. Blokuující filtrace

vzniká tehdy, když částice zeminy mají zhruba stejný průměr jako otvory v geotextilii. Ty pak uvíznou ve struktuře filtru a brání průtoku vody do jádra drénu. Pokud jsou částice zeminy menší než otvory v geotextilii, dochází k hlubinné filtraci. Částice přilnou ke geotextilii a odpor filtru se zvyšuje. Zvyšující se tlak při filtraci pak zapříčiní, že jsou částice z geotextilie uvolněny a odpor filtru opět klesá [17, s. 68, 69].

4.2.4.3 Pevnost v tahu

Vertikální drény jsou vystavovány také tahovému napětí, a proto by měly mít dostatečnou pevnost, aby danému zatížení odolaly. Při působení tahového napětí je drén protahován, čímž dochází k poměrnému zúžení, které negativně ovlivní celkovou průtokovou kapacitu.

Vertikální drén musí být schopen odolávat tahovému namáhání o síle 0,5 kN, aniž by se výsledná hodnota prodloužení zvětšila o více než 10 %. V nevhodných podmínkách, například v promrzlé půdě, může být prodloužení menší než 20 %. V dnešní době je zcela běžné, že tahové napětí v suchých či mokřích podmínkách je větší než 1 kN a prodloužení je větší než 10 % [12, s. 112].

4.2.4.4 Smear zóna (porušená oblast)

Instalace PVD je prováděna za pomoci ocelového trnu držícího drén při zatlačování do zeminy. Na spodní část drénu je připevněna kotevní deska, která slouží k fixaci drénu v zemině. Pohyb trnu při instalaci narušuje okolní zeminu, což negativně ovlivňuje její hydraulické vlastnosti. Například propustnost je v okolí drénu 2–3krát menší než u neporušené zeminy [12, s. 98].

Průměr této porušené oblasti, tzv. smear zóny se liší typem zeminy, její citlivostí na deformace a dalšími faktory. Kompromisem všech předešlých studií průměru smear zóny jsou následující rovnice [12, s. 98]:

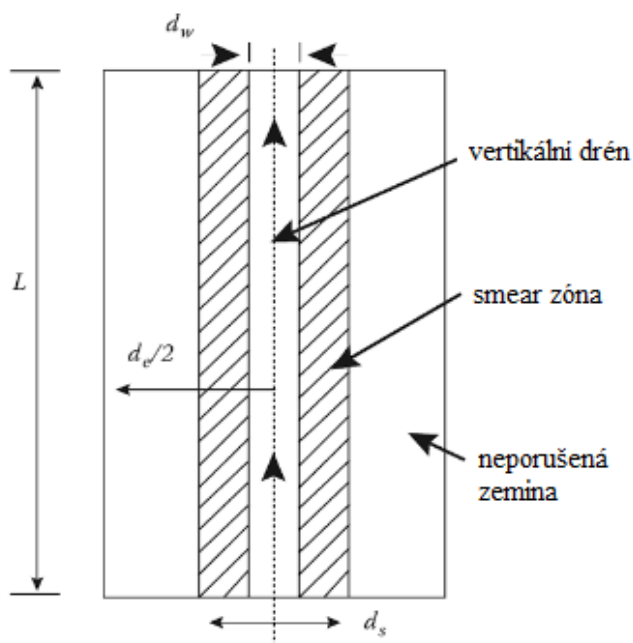
$$d_s = (4 - 7) \cdot d_w$$

nebo

$$d_s = (3 - 4) \cdot d_m$$

(4.2.4.4.1)

kde: d_s – průměr smear zóny [m]
 d_m – ekvivalentní průměr trnu [m]
 d_w – ekvivalentní průměr drénu [m]



Obr. 4.2.4.4.1 Smear zóna v okolí vertikálního drénu [17, s. 97, upr.]

Protože náklady na vertikální drenáž se v posledních letech radikálně snížily, je tendence instalovat drény s malou roztečí, aby se co nejefektivněji zkrátila doba konsolidace. To může být mnohdy značně kontraproduktivní. Například v situaci, kdy je vzdálenost dvou sousedních drénů 1 m a průměr smear zóny je v okolí drénu 0,5 m, dochází k degradaci zeminy téměř kdekoli [15].

Pro snížení negativního efektu smear zóny je důležité vybrat ideální tvar a rozměr trnu. Prakticky existují 4 základní tvary průřezu: kosočtvercový (vykazuje nejlepší vlastnosti), čtvercový, obdélníkový a kruhový. Také platí, že čím větší je trn, tím větší je průměr smear zóny. Proto je nutné volit co nejmenší rozměry. Na rozsah porušení při instalaci má vliv také velikost kotevní desky [15].

Podstatnou součástí návrhu je i způsob zatlačování trnu do zeminy a jeho rychlost. Statické zatlačování způsobuje daleko menší porušení než vibrování [11].

4.2.5 Zkoušky na ověření jakosti PVD

Vzhledem k obrovskému využití vertikálních drénů v projektech ke zlepšování únosnosti zemin je nezbytné ověřit jejich kvalitu prostřednictvím laboratorních zkoušek. Je důležité zkontrolovat co nejvíce parametrů spjatých s vertikálními drény, např. průtokové množství, tahové napětí, rozměry, AOS geotextilie. Zkoušky však nejsou jednotné. Existuje spousta metod k ověření jakosti a jsou prováděné za různých podmínek. Výsledky se tedy mohou značně lišit. Proto byl vytvořen soubor metod pro provádění nejen kontrolních, ale i srovnávacích a doporučujících zkoušek.

4.2.5.1 Stanovení AOS geotextilie

Běžnou metodou pro stanovení AOS dané textilie je suché prosívání. Je aplikovatelná na geotextilie s otvory většími než 40 μm . Provádí se při hodnotě 60 % přirozené vlhkosti a teplotě 20 °C a dle normy ASTM D4751 [12, s. 120].

Při provádění zkoušky je vzorek geotextilie (100 mm široký a 100 mm dlouhý) pevně umístěn do rámu síta. Na povrch se vloží 50 g skleněných korálek v příslušných frakcích (průměr 40–70 μm), které odpovídají rozsahu testovaných geotextilií. Síto s krytem se umístí do přístroje, který vykonává vertikální a horizontální pohyby, což způsobí, že se kuličky různě odrážejí a otáčejí a prosívají se filtračním vzorkem. Celkový čas prosévání je 10 minut. Výsledkem je procentuální podíl hmotnosti korálek na dně misky k celkové hmotnosti všech korálek. Proces se opakuje při různých frakcích skleněných korálek až do stanovení hodnoty O_{95} . [15].

Podobnou zkouškou je metoda mokrého prosívání, která se řídí normou EN 12596. Rozdíl spočívá v tom, že se voda rozstříkuje na speciální zrnitý materiál, který se dále prosívá přes danou geotextilii. Výsledná hodnota $O_{95\text{wet}}$ nám napomáhá určit AOS geotextilie z křivky zrnitosti zemin. [18, s. 54].

4.2.5.2 Permeabilita (permitivita) filtru

Permeabilita ve směru kolmém k povrchu filtru, tzv. permitivita, se měří dle normy ASTM D4491-96 pomocí konstantního hydrostatického tlaku. Zařízení, které bylo speciálně navrženo pro tyto účely, se nazývá permeametr (propustoměr) [15].

Filtr o tloušťce δ je vyříznut do kruhového tvaru a umístěn do permeamtru. Podmínkou zkoušky je laminární proudění a konstantní tlak vodního sloupce. Toho se docílí tak, že přebytečné množství vody nad vzorkem přepadne přes permeametr a voda propuštěná přes vzorek vytéká pryč ventilem instalovaným ve spodní části zařízení. Výsledná propustnost je dána vztahem:

$$k = \frac{V \cdot \delta}{A \cdot \Delta h \cdot t} \quad (4.2.5.2.1)$$

kde: k – permeabilita filtru při teplotě 20 °C [m.s⁻¹]

V – objem vody [m³]

δ – tloušťka filtru [m]

A – efektivní plocha [m²]

Δh – celková výška (tloušťka filtru + výška vody nad filtrem) [m]

t – čas [s]

Pro každý vzorek geotextilie je permeabilita změřena při různých výškách vodního sloupce.

4.2.5.3 Zkouška na průtokové množství

Metoda pro stanovení průtokového množství čerpá především z normy ISO 18325 [19]. Průtokové množství drénu se obvykle měří pro rovný i pro deformovaný drén a to proto, že u zdeformovaného stavu je výrazně snížena celková hodnota průtokového množství. Drény jsou testované v in-situ podmínkách, kdy je drén obklopen zeminou, ale i mimo ní, kde je drén obalen gumovou membránou. Za normálních okolností je zkouška průtokového množství dokončena během jednoho až dvou dnů, nicméně účinek dědičného dotvarování, tzv. creepu se projeví až po několika týdnech.

Při laboratorní zkoušce se nejprve vzorek drénu délky 300±10 mm a šířky 100 mm vysuší a uchová při teplotě 20±2 °C na 24 hodin. Vzorek se obalí gumovou vodotěsnou membránou

tloušťky 0,35 mm tak, aby vytvořila zcela hladký povrch. Drén se svisle upevní do tlakové komory válcového tvaru. Pro vytvoření zdeformovaného stavu upneme drén do speciálního rámu, který zajistí požadovaný ohyb. Poté je do tlakové komory zaveden hydrostatický tlak v hodnotě 10 kPa. Nutností je zkontrolovat vodotěsnost membrány a celé komory. Když proudící voda prochází drénem, výškový rozdíl vodních hladin by měl být v souladu s hydraulickým gradientem v in-situ podmínkách, což je obvykle 0,1. Změří se rychlost proudění vzorkem drénu a na základě Darcyho zákona se vypočte průtokové množství q_w [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

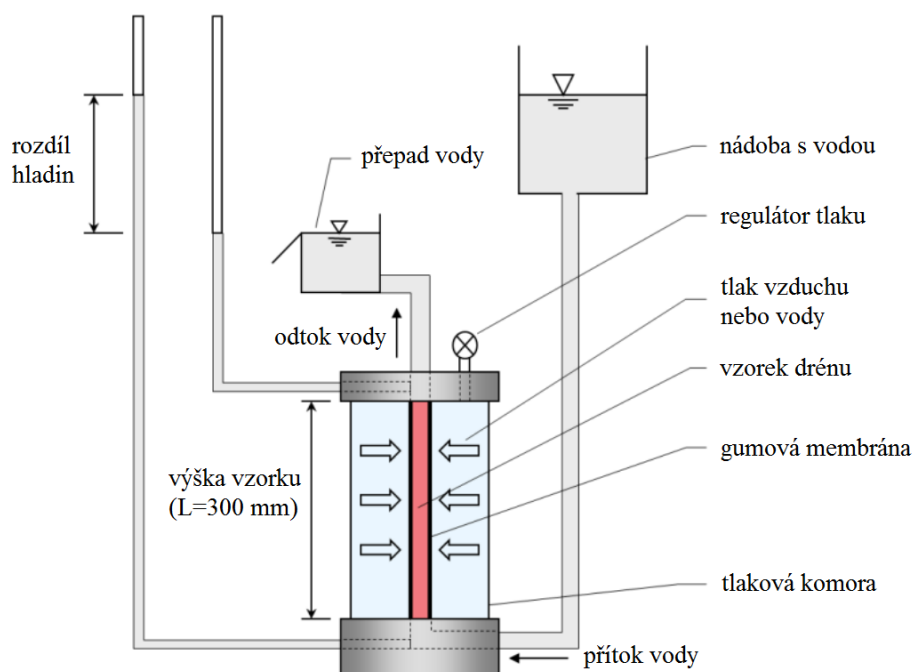
$$q_w = \frac{Q \cdot R_T}{i} \quad (4.2.5.3.1)$$

kde: Q – rychlost proudění [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

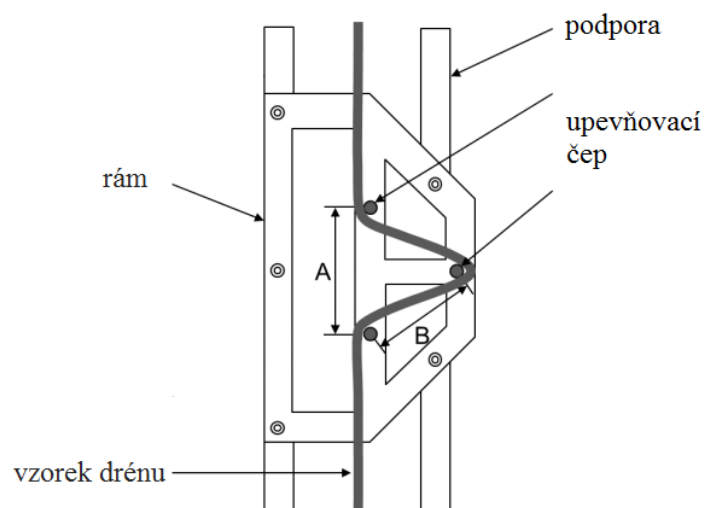
i – hydraulický gradient [-]

R_T – korekční faktor pro teplotu vody 20 °C [-]

Vzhledem k tomu, že se průtokové množství mění úměrně se svislým zatížením, tak se pomocí regulátoru tlaku mohou postupně zvyšovat hodnoty tlaků o 50 kPa (50, 150, 250, 300 kPa). Nadměrné rozdíly v tlaku by mohly poškodit povrch gumové membrány.



Obr. 4.2.5.3.1 Schéma zkušebního přístroje na stanovení průtokového množství [19, upr.]



Obr. 4.2.5.3.2 Schéma rámu pro ohyb drénu [19, upr.]

4.2.5.4 Zkouška tahového napětí

Zkouška pevnosti v tahu daného PVD nebo geotextilního filtru je řízena odlišnými normami (EN ISO 10319 či ASTM D4632). V podstatě je postup stejný, odlišnosti jsou pouze v šířce vzorku nebo rychlosti zatěžování.

Dle ASTM D4632 se zkušební vzorek délky 200 mm upne do svorek ve zkušební přístroji, na který je vyvíjena tahová síla v hodnotě 300 ± 10 mm/min. Vzorek se konstantně prodlužuje tak dlouho, než se roztrhne. Měří se maximální tahová síla, protažení a absorpce energie. Při zkoušce tahového napětí pro nasáklý stav je vzorek drénu či geotextilie ponořen do vody na 48 hodin. [12, s. 129, 130]

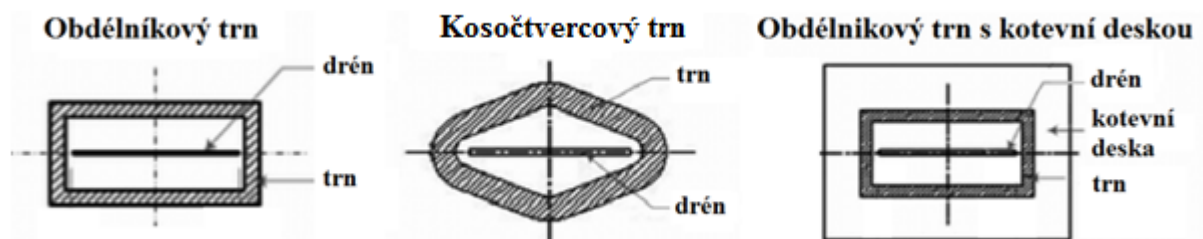
4.2.5.5 Další zkoušky

Pro dokonalé stanovení všech vlastností jádra vertikálního drénu i geotextilie je potřeba vzorky otestovat více zkouškami. Například u geotextilního filtru se také zjišťuje tloušťka při daných tlacích a provádí se statická zkouška průrazem (ocelový hrot tlačěn konstantní rychlostí na střed vzorku), trhací zkouška (zatížení působí na vzorek podélně až do roztržení), zkouška dynamické perforace (ocelový kužel padá z určité výšky na střed upevněné geotextilie) a další [18].

4.2.6 Instalace

Instalace vertikálních drénů je prováděna pomocí dutého ocelového trnu, který je součástí speciálně navržených instalačních souprav připevněných na hydraulickém rypadle. Ty se v podstatě liší způsobem zatlačování. Existují soupravy využívající statického zatlačování nebo vibrování, což je metoda vhodná pro tuhé zeminy. Pokud je zemina mimořádně tuhá, využívá se předvrtání. Pro instalaci vertikálních drénů ve velmi měkkých zeminách se používají odlehčená rypadla a pro instalaci pod hladinou vody se rypadlo nachází na plovoucím voru [12, s. 115].

Trn musí být dostatečně pevný, aby nedocházelo k jeho deformacím vlivem nárazů do kamenů či velmi tuhých vrstev zeminy. Nejpoužívanějším typem je trn s obdélníkovým průřezem délky 120–145 mm, šířky 60 mm, tloušťky stěny 10 mm a s kosočtvercovým průřezem délky 120–145 mm, šířky 50–85 mm a tloušťky stěny 5–15 mm. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.4.4, zvolený typ trnu přímo ovlivňuje velikost smear zóny. Je proto nutné volit co nejmenší průřez trnu [12, s. 116,117].

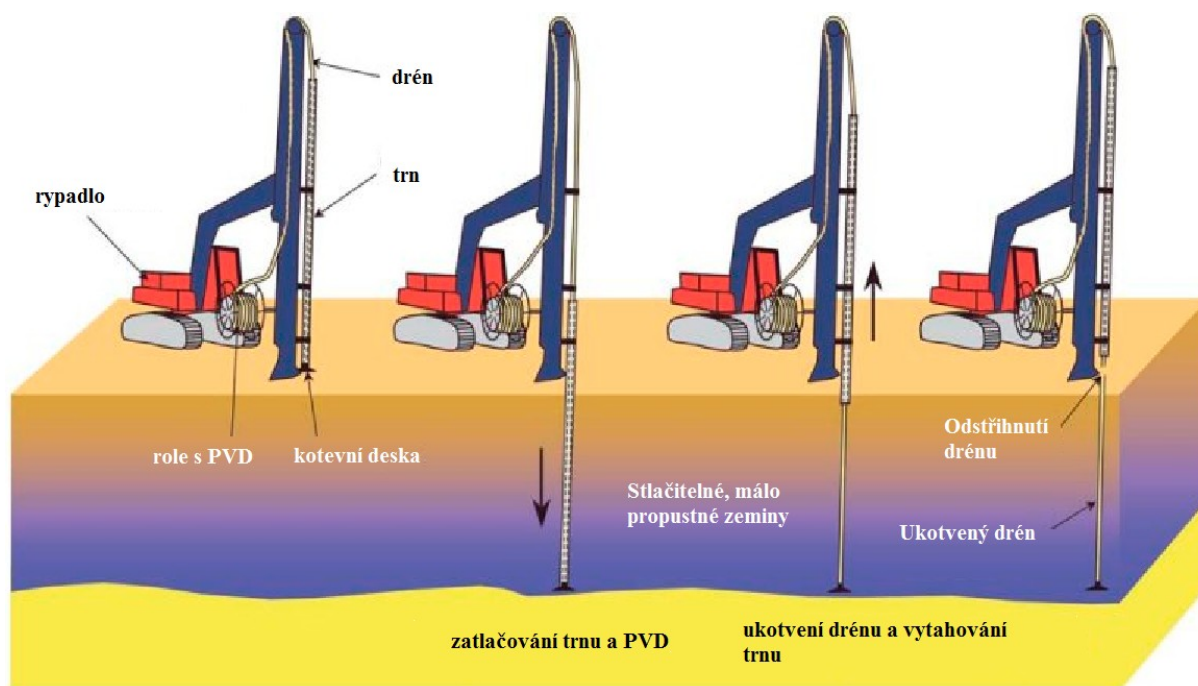


Obr. 4.2.6.1 Nejpoužívanější průřezy trnů při instalaci PVD [28, upr.]

Prefabrikované vertikální drény jsou dodávány v rolích, které jsou připojeny k instalační soupravě. Konec drénu je protáhnut skrz kotevní desku nebo tyč a ohnut tak, aby dosahoval do vzdálenosti min. 300 mm od povrchu kotevní desky, kde se následně sesvorkuje [12, s. 120]. Trn je zvoleným způsobem zatlačován do zeminy, a jakmile dosáhne požadované hloubky, je vytažen zpět na povrch. Kotevní deska pak zajistí fixaci drénu v zemině, čímž nedojde k jeho vytržení zároveň s vytahováním trnu. Důležité je, aby dosažená hloubka odpovídala návrhu, protože veškerá předpokládaná data, především doba konsolidace, by byla chybná. Hloubka, které dosáhl vertikální drén, se měří především pomocí délkového měřidla na soupravě či digitálně. Přesnějším způsobem stanovení hloubky penetrace je metoda umístění rysky přímo na povrchu drénu nebo měření elektrického odporu na dvojici

měděných drátů protáhnutých geotextilií a spojených na konci PVD. Elektrický odpor se mění v závislosti na délce, čímž se snadno získají požadované hodnoty [12, s. 131-34].

Drén se ustříhne 150–200 mm nad úrovní terénu [11], rypadlo s instalační soupravou se přesune na další určené místo a technologický proces se opakuje. Instalace je jednoduše kontrolována pomocí elektronických zařízení v kabině strojníka. Po nainstalování všech drénů napříč celým zeminovým podložím je drénované území opatřeno násypem. V ideálním případě by se měla poslední řada drénů nacházet ve vzdálenosti jedné třetiny až poloviny výšky násypu za navrženým násypem.



Obr. 4.2.6.2 Schéma instalace PVD [11, upr.]

5 Příklady aplikací vertikálních drénů na stavbách v ČR i zahraničí

5.1 Urychlení konsolidace podloží na železniční trati Bratislava Rača – Trnava

V rámci modernizace železniční trati spojující města Bratislava a Trnava bylo v roce 2002 rozhodnuto o zvýšení návrhové rychlosti na 160 km/hod., čímž bylo nutné zvětšit poloměr oblouku v trase. [21, s. 1]

Lokalita, která nese označení „Šenkvická preložka“, je po geologické stránce tvořená kvartérními sedimenty. Ty tvoří především hlíny, písky, spraše nebo jílovitohlinité vrstvy v hloubce 4–10 m. Povrchovou vrstvu tvoří humusovité hlíny mocnosti 0,3–2 m.

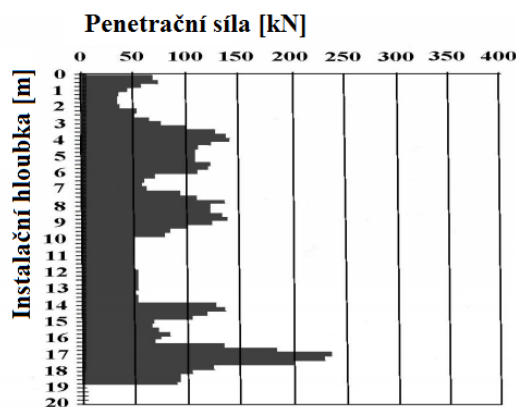
Pod kvartérními sedimenty se nachází vrstva neogenních sedimentů, tvořená písčitými jíly, jíly se střední, vysokou a velmi vysokou plasticitou či rašelinou v hloubce 15–30 m. Hladina podzemní vody se nachází v hloubce 0,5–1,5 m. Vzhledem k nepříznivým inženýrsko-geologickým poměrům si investor vyžádal dosažení 95% konsolidace podloží během dvou let po skončení budování až 7 m vysokého násypu [21, s. 1].

Jenomže stavba, projektantem zařazená do 3. geotechnické kategorie, si vyžádala okamžité urychlení konsolidace podloží a to pomocí geosyntetických geodrénu. Ty se jeví jako ekonomicky výhodnější a technicky méně náročné v porovnání s pískovými piloty [21, s. 1].

Nejprve bylo nutné vybudovat 250 mm mocnou technologickou vrstvu z šterkodrtě vyztuženou dvojnosou geomříží, která sloužila nejen na přesun strojů, ale i jako budoucí horizontální plošná drenáž [21, s. 1]. Poté došlo k instalaci vertikálních drénů pomocí hydraulického pásového nosiče Liebherr typu R 954 BV na jehož nástavec byla upevněná 20 m dlouhá instalační ocelová hlavice typu Cofra MY-200. Toto zařízení dokáže instalovat 4–5 km geodrénu během 12 hodin do hloubky 35 m [21, s. 2].

V návaznosti na předcházející projekty se nejlepší variantou vertikálních drénů jevil typ Mebradrain MD7007, který se instaloval v trojúhelníkovém rastru o délce strany 1,4 m a do hloubky kolem 10 m. V nejméně příznivých geologických podmínkách byla rozteč drénů zkrácena na 1 m. Tyto geodrény jsou schopny poskytovat minimálně 75% drenážní schopnost i při 50% deformaci [21, s. 2].

Obsluha stroje se řídila pomocí speciálního softwarového zařízení Datalogger, které zaznamenává pořadové číslo drénu, datum vpichu každého drénu, instalační hloubku a penetrační sílu každých 250 mm. Tyto informace byly po ukončení instalačního procesu vyhodnoceny a bylo možné konstatovat, že během 31 pracovních dní se nainstalovalo 15 715 ks Mebradrainů v celkové délce 149 500 m. Doba aplikace geodrénu o průměrné délce 10 m byla i s přesunem stroje stanovena na 50–95 sek [21, s. 3].



Obr. 5.1.1 Grafický výstup průběhu instalace [21, s. 3, upr.]

5.2 Urychlení konsolidace podloží na letišti Arlanda ve Stockholmu

Výstavba v pořadí třetí přistávací dráhy délky 2 500 m na Stockholmském letišti Arlanda a ostatních budov spjatých s tímto projektem (pojezdové dráhy, prostory pro odmrazování a úpravu povrchové vody, mosty, chodníky, kontrolní věže) zahrnovala geotechnický a geologický průzkum dané lokality a instalaci vertikálních geodrénu [20, s. 73].

Plocha s rozlohou 250 000 m² byla rozdělená na tři pozorovací stanoviště – oblast K, L a D. Zeminu v oblastech K a L, situovaných podél pojezdových drah, tvoří jílovitohlinité podloží s občasnými pískovými mezivrstvami. Na ní se pak nachází poměrně tenká organická vrstva. Jíl je v této oblasti středně až vysoce plastický, středně konsolidovaný, s 60–90 % vody. Neodvodněná pevnost ve smyku je 7–9 kPa nehlédě na hloubku. Podzemní voda se nachází na úrovni terénu. Oblast D se nachází v bažinném prostředí, které tvoří 2-3 m mocná vrstva rašeliny s bahnitým a jílovitým podložím. Jíl má střední až vysokou plasticitu a je středně konsolidován. Podíl vody je 50–100 %. Bahno je tvořeno ze 180 % vodou. Smyková neodvodněná pevnost je 6–14 kPa. Hladina podzemní vody se nachází 0,5 m pod povrchem, ale v důsledku odtěžení rašeliny byla snížena na úroveň 1,5 m pod povrchem [20, s. 74, 75].

Součinitel konsolidace c_v je v oblastech K a L dle edometrické zkoušky roven 0,2–0,3 m²/rok v předkonsolidační fázi a 0,5–1 m²/rok na konci primární konsolidace pod maximálním zatížením 300 kN.m⁻². V oblasti D je součinitel konsolidace c_v roven 0,15–0,3 m²/rok v předkonsolidační fázi a 0,3–1,3 m²/rok na konci primární konsolidace pod maximálním zatížením 300 kN.m⁻² [20, s. 77].

Monitoring pórových tlaků byl prováděn za pomoci piezometrů, které byly umístěny do betonových trubek o vnějším průměru 1 m. Vzdálenost piezometru k nejbližšímu drénu je 0,9 m [20, s. 78, 79].

Požadavek investora na maximální sednutí vrstev k úspěšné realizaci projektu byl 30 mm. Aby bylo dosaženo 95% konsolidace během 12 měsíců pod 14–20m vysokým násypem, přistoupilo se k instalaci prefabrikovaných vertikálních drénů Mebradrain 88 v trojúhelníkovém rastru o délce strany 0,9 m. Tento drén má rozměry 100 mm šířky a 4 mm tloušťky a je schopen plně vykonávat drenážní funkci i při 35% deformaci. Polypropylenové jádro je obaleno geotextilií ze stejného materiálu a tepelně spojeno. Mebradrain 88 byl dodáván ve 250 m rolích [20, s. 74].

Instalace vertikálního drénu byla prováděna za pomoci hydraulického pásového nosiče s instalační rychlostí 6 000–8 000 m drénů za den. Pro správnou funkci vertikálních drénů bylo nutné stanovit rozsah zóny porušení vznikající během instalace v okolí drénu. Ta závisí na typu zeminy a geometrii trnu. Ekvivalentní průměr geodrénu, který koresponduje kruhovému půdorysu, je roven 66 mm. Laboratorní průzkumy upravily předpoklad, že průměr porušené vrstvy je 2krát větší než průměr geodrénu a stanovily jej na hodnotu 1,6krát větší než průměr geodrénu. Rozsah porušené zóny je pak roven 150 mm [20, s. 74].

Přetížení násypem pak způsobilo 22–29% stlačení podloží, které odpovídá celkovému sedání 1,6–2,6 m [20, s. 73].

5.3 Urychlení konsolidace štěrkovými pilíři na úseku R55

V roce 2009 na úseku rychlostní komunikace R55 Skalka – Hulín realizovala firma KELLER – speciální zakládání, spol. štěrkové pilíře určené pro drénování podloží násypového tělesa k urychlení konsolidačního procesu, zvýšení únosnosti zeminy a snížení její stlačitelnosti.

Inženýrsko-geologický průzkum v trase ukázal, že podloží je tvořeno především jemnozrnnými, málo únosnými a silně stlačitelnými zeminami. Vzhledem k těmto nepříznivým geologickým podmínkám a hodnotám sedání, získaných z podrobného geotechnického průzkumu, byla navržena sanace zeminového podloží pod násypem.

V zemině byly vibrováním zhotoveny štěrkové pilíře průměru 600 mm rozmístěné v trojúhelníkovém rastru o délce strany nepřímo úměrné výšce násypu (2,1–2,6 m) a následně byly zhutňovány 1–3 stroji Tragraupe. Na tyto konsolidační pilíře byla navázána horizontální plošná drenáž tloušťky 600 mm, která vytlačenou drénovanou vodu odvádí mimo násypové těleso.



Obr. 5.3.1 Vibrování štěrkových pilířů [22]

V jednom úseku plánované trasy vedené na vysokém náspu se nachází plošně založený přesypávaný mostní objekt, v jehož podloží byly rovněž zhotoveny štěrkové pilíře průměru 800 mm ve čtvercovém rastru o délce strany 1,4 m.

Na okrajích sanovaných oblastí docházelo k rozšiřování až 10 m mocných, měkkých až tuhých náplavových jílu, což vedlo k rozhodnutí o rozšíření nutné plochy sanace. Stavební práce a termíny dokončení také komplikovaly přeložky inženýrských sítí.

Projekt sanace zeminového podloží na úseku R55 v konečné fázi zahrnoval 7 350 vibrovaných štěrkových pilířů průměru 600 mm o celkové délce 41 520,6 m a 504 pilířů průměru 800 mm o celkové délce 4 221,8 m [22].

6 Tvorba ilustračního výukového modelu funkce vertikálních drénů

6.1 Princip a vývoj 3D tisku

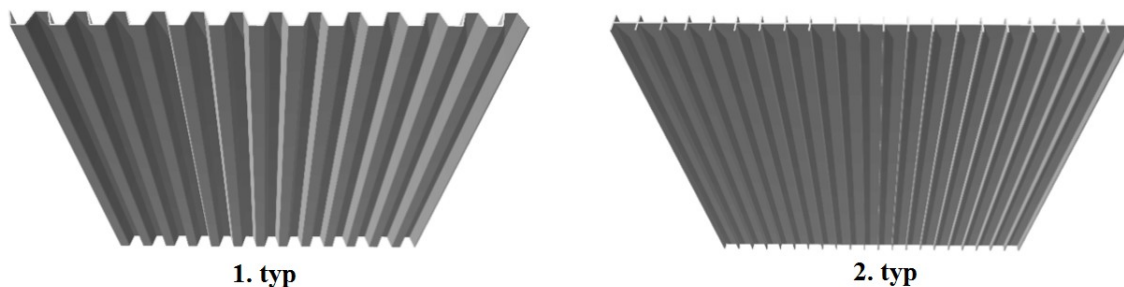
Jako způsob výroby vlastního vertikálního drénu jsem zvolil 3D tisk, což je proces, při kterém se z digitální předlohy vytváří fyzický model. Je založen na principu aditivní výroby, kdy je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu. Opakem je subtraktivní výroba, kdy se z celistvého bloku materiál opracovává příslušnými stroji, dokud nedosáhne požadovaného tvaru. Aditivní proces je však výhodnější, protože se při tisku nevytváří žádný odpadní materiál a možnosti tvarování jsou téměř neomezené [23].

3D tiskárna, kterou jsem pro výrobu drénů využil, funguje pomocí technologie FDM. Velmi tenká plastová struna namotaná v zásobníku je vtlačována do tryskové hlavy, v níž se roztaví a postupně je po vrstvách nanášena na podkladní desku. Tryska je řízena počítačem a kopíruje předepsaný model [23].

3D tiskárny zažívají v současné době rychlý rozvoj a v budoucnu by mohly hrát ve stavebnictví podstatnou roli. Kladou si nízké finanční nároky na tisk, ale zároveň pracují rychle a efektivně. Nejen, že jsme v současné době schopni vytisknout nábytek či jiné doplňky do obytných budov, ale některé americké i asijské firmy zvládají celou stavební konstrukci [24]. 3D tisk by také mohl ovlivnit výrobu stavebních materiálů, například rychleschnoucí beton vyztužený o ocelová vlákna [24] nebo geosyntetický materiál [25], který by v případě vertikálních drénů mohl pomoci k lepším drenážním vlastnostem. Má práce však spočívá v návrhu a tisku jádra PVD.

6.2 Tvorba modelu

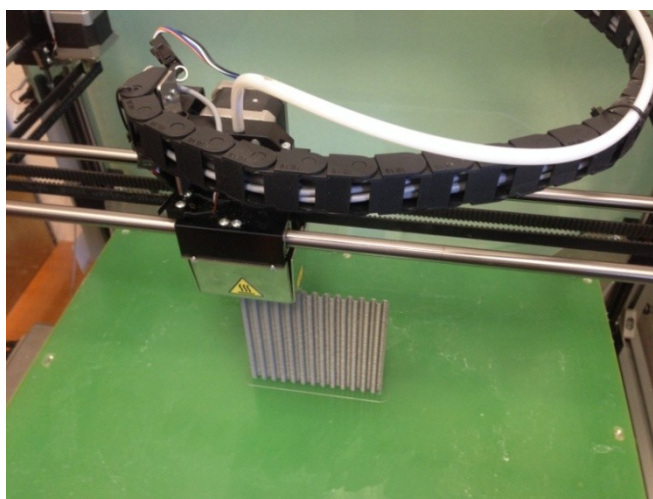
K vytištění drénu bylo potřeba několika kroků. Prvním bylo vytvoření 3D modelu pomocí programu AutoCAD. V zásadě se jednalo o dva typy vertikálních drénů se standardizovanými rozměry 100 mm šířky a 4 mm tloušťky. Nejprve jsem vykreslil průřezy drénů inspirované typy MD 7007* a MD 88H* od společnosti MebraDrain a následně celý půdorys vytáhl do výšky 150 mm. Z obavy před ohnutím a deformací tak vysokého vzorku při tisku jsem celkovou konstrukční výšku snížil na 100 mm. Před samotným tiskem bylo nutné model převést do formátu STL, který je schopna tiskárna přečíst. Dále se musel vytvořit tzv. G-Code, který dává tiskárně pokyny pro pohyb motorů nebo ovládání trysky.



Obr. 6.2.1 Modely vertikálních drénů (výstup z programu 3D Builder)

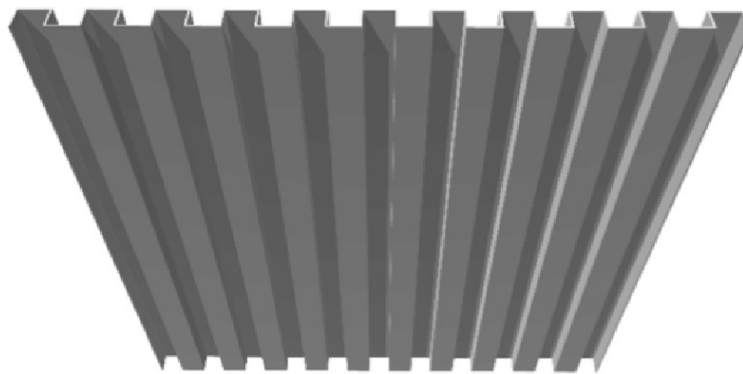
6.3 3D tisk

Tisk prvního vzorku jádra vertikálního drénu byl bezproblémový a trval cca 2 a půl hodiny. Tryska se pohybovala horizontálně a kopírovala tvar drénu. Nicméně na některých místech se objevily jakostní chyby v celistvosti vzorku způsobené vynecháním trysky. To by mohlo mít při tisku drenážního jádra pro stavební účely negativní dopad na průtokové množství daného drénu.



Obr. 6.3.1 3D tisk vertikálního drénu (Foto autor)

Při druhém modelu nebyla tryska schopna vykonat kontinuální pohyb a kopírovat tak průřez drénu, proto byl tisk přerušen. Alternativou pro druhý model byl průřez inspirovaný typem MD7007** se stejnými rozměry, jehož drážky byly na rozdíl od prvního modelu rovnoběžné.



3. typ

Obr. 6.3.2 Alternativa za nepovedený výtisk 2. modelu (výstup z programu 3D Builder)

Tenhle typ se paradoxně jevil jako nejlepší. Model byl celistvý, bez sebemenších vad. Doba tisku byla přibližně stejná jako u předchozího vzorku. Celkové náklady na tisk byly zanedbatelné a čítaly pouze elektrickou energii na provoz tiskárny a počítače a použitou část tiskové struny.

Pro odvodnění zeminového podloží je potřeba až několika tisíc metrů vertikálních drénů. Proto by dle mých nově nabytých zkušeností bylo v současné době značně neefektivní tisknout jádro PVD na 3D tiskárně. K tisku jsem použil pouze nejzákladnější typ 3D tiskárny. Při použití kvalitnější tiskárny je pravděpodobné, že se doba tisku značně zkrátí.

6.4 Aplikace do odebraného vzorku zeminy

Nejprve bylo nutné obalit vytisknuté jádra filtračním pláštěm, aby se zamezilo jejich zanášení zeminou. Jako filtr jsem použil netkanou polyesterovou geotextilii, kterou jsem upravil do příčného tvaru a spojil tavným lepidlem.

Dalším krokem bylo vybrat vhodnou zeminu. Vertikální drény jsou nejčastěji instalovány do vysoce stlačitelného, vodou nasyceného jílovitého podloží. Pro potřeby ilustračního modelu je ale konsolidační proces v takovýchto zeminách příliš zdoluhavý. Proto jsem volil zeminu, kde se snadněji rozptýlí pórové tlaky. Typickým příkladem je hlína písčítá.

Tuto zeminu jsem umístil do skleněného akvária o rozměrech 0,6x0,3 m zhruba do výšky 50 mm. Vodu jsem obarvil potravinářským barvivem, abych snadněji indikoval její prostup

vertikálním drénem, a smíchal s připravenou zeminou. Vytvořil jsem tak kašovitou směs. Následně jsem do zeminy aplikoval 2 vytisknuté vzorky drénů obalené geotextilií, 1 originální vzorek drénu Colbondrain CX 1000 a 2 slámky vyplněné pískem a tkaninou a rozmístil je pravidelně v celém akváriu. Zeminu jsem přitížil 20 mm mocnou vrstvou písku, která má za cíl simulovat násyp a odvádět drénovanou vodu. Pro umocnění přitížení jsem na pískovou vrstvu umístil závaží. Mezi zeminu a pískovou vrstvu jsem vložil dřevěnou desku s vyřezanými otvory na vertikální drény, abych snadněji rozptýlil zatížení na celou plochu.

Po 48 hodinách jsem výsledek procesu zkontroloval. Písek v oblasti PVD byl vlhký, tzn., že pórová voda vzlínala směrem k povrchu, kde se následně rozptýlila. Písek v oblasti vlastnoručně vyráběných drénů byl výrazně sušší. Zemina byla pevnější, více ulehlá a neprotékala mezi prsty jako před odvodněním. Po vytažení drénů jsem však zjistil, že zemina při aplikaci zanesla jádro drénu a tím i omezila jeho drenážní vlastnosti. Dírky ve slámkách byly zaneseny úplně, proto jsem se rozhodl, že proces zopakuji pouze s použitím PVD.



Obr. 6.4.1. Vzorky PVD v odvodněné zemině při prvním pokusu

Vzorky drénů jsem očistil a spodní stranu opatřil plastovou destičkou. Ta zamezí zanášení drénů při aplikaci do zeminy, čímž v podstatě simuluje funkci kotevní desky. Připravil jsem stejnou zeminu o mocnosti 80 mm a drény opatrně zarazil do hloubky cca 70 mm. Na zeminu jsem opět položil dřevěnou desku s vyřezanými otvory. Rozhodl jsem se, že pískovou

horizontální vrstvu neumístím v okolí drénů, abych mohl lépe kontrolovat odtékající pórovou vodu. Desku jsem zatížil závažím a zhruba po 4 hodinách jsem mohl znatelně rozeznat vztlínající vodu v drážkách drénů.

Po 24 hodinách jsem průběh konsolidačního procesu zkontroloval. U drénů se stále držela voda, geotextilie byla nasáklá až k povrchu a písek na dřevěné desce byl kompletně mokrý. Na dně akvária byla zemina sušší a pevnější než na povrchu, kde se stále držela voda. To může být způsobené krátkou dobou konsolidačního procesu, ale spíše tím, že voda, která prošla drénem, neměla kam odtékat, tudíž se vracela zpět do zeminy.



Obr. 6.4.2 Vzorky PVD po 4 hodinách při druhém pokusu

Tímto pokusem jsem názorně předvedl, jak funguje konsolidační proces. Pórová voda pod účinkem zatížení opravdu směřovala k nejbližšímu drénu, kde poté vztlínala k povrchu. Bohužel se mi nepodařilo určit, který z drénů byl účinnější, protože barvivo ve vodě nezaznamenalo na filtru výraznější stopu. Což se však potvrdilo, je, že geotextilní filtr zabránil průchodu částicím zeminy, čímž nedocházelo k zanášení jádra.

7 Závěr

Vertikální drény jsou do zeminy instalovány cíleně, aby napomohly k snížení konsolidačního času v důsledku zkrácení drenážních drah. Tato práce ověřila, že zemina poté vykazuje lepší mechanické vlastnosti a je tudíž vhodná pro stavební konstrukce. Posoudila výhody a nevýhody pískových drénů a velká část je v ní věnována rozboru drénů prefabrikovaných. Ty se opravdu jeví jako nejefektivnější způsob odvodnění. Jsou levné, účinné a jejich instalace je rychlá a technicky nenáročná. Potvrzuje také, že volba vhodné geotextilie je důležitým kritériem pro drenážní schopnosti daného drénu. Její filtrační schopnosti jsou převážně tvořeny propustností, velikostí otvorů ve struktuře a také umístěním do konkrétní zeminy.

Při zkoumání postupů laboratorních zkoušek jsem zjistil, že neexistuje jen jedna metoda pro stanovení vlastností geodrénů, ale postupy se řídí několika normami. To z pohledu geotechnika značně komplikuje výběr vhodného prefabrikovaného drénu, protože výrobci respektují především normy svého státu.

Při rešerši projektů odvodnění zeminového podloží pomocí vertikálních drénů jsem se převážně setkával s využitím prefabrikovaných drénů a to především v Asii a Americe. Tam také probíhá rozsáhlý výzkum nových technologií v této oblasti, ať už jádra vertikálního drénu, filtru nebo kotevní desky, která za účelem omezení porušení zeminy při instalaci může být asymetrická. S výzkumem nových technologií souvisí také 3D tisk. Ten by mohl v budoucnu pomoci k získání lepších drenážních vlastností prostřednictvím nových tvarů drenážního jádra nebo vysoce jakostní geotextilie.

Prakticky jsem vyzkoušel, co obnáší proces 3D tisku a výroba vlastního vertikálního drénu. Na něm jsem simuloval proces primární konsolidace a ověřil si, že vertikální drény představují účinný způsob úpravy zeminového prostředí.

Seznam použité literatury

- [1] HRUBEŠOVÁ, Eva. *Konsolidace-přednáška* [online]. Ostrava: VŠB-TU, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjB-pCHjJLTaHUBtBQKHdyFDi0QFggZMAA&url=http%3A%2F%2Ffast10.vsb.cz%2Fhrubesova%2FPREDNES.doc&usg=AFQjCNEZsz4rfvZeUeS6M30-PZCWlkoB4w&sig2=CXNYk5DjF7S9_YFYV_E4zg&bém=bv.152174688,d.bGs
- [2] VANÍČEK, Martin a Jiří VANÍČEK. Urychlení konsolidace podloží: Svislé geodrény. *Stavitel* [online]. 1992-, **2001**(5), 1-2 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.geosyntetika.cz/files/download/stavitel-svisle-geodreny.pdf>
- [3] HORÁČKOVÁ, Svatava. Drenáže. *IGS News* [online]. 2012, **2011**(1), 1-6 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://www.igs.cz/images/dokumenty/IGS_news_2011-4.pdf
- [4] Vertikální drény Mebradrain. In: *Cofra-Chemia* [online]. Slovensko: Cofra-chemia, c2008-2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.cofra.sk/sk/produkty/Vertikalne-dreny-MebraDrain.alej>
- [5] MIČA, Lumír. *Zemní konstrukce* [online]. Brno: VUT FAST, Ústav geotechniky [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: [http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20\(semester%201%20-%202010\)%20-%20-%20-9-semester/-%20CF01%20-%20Zemni%20konstrukce/prednasky/prednaska_navrh_podlozi/Zemni%20konstrukce_prednaska_podlozi.pdf](http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20(semester%201%20-%202010)%20-%20-%20-9-semester/-%20CF01%20-%20Zemni%20konstrukce/prednasky/prednaska_navrh_podlozi/Zemni%20konstrukce_prednaska_podlozi.pdf)
- [6] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin: Vlastnosti zemin* [online]. Brno, 2005 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20%28semester%201%20-%202010%29%20-%20-%20-4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/Ucebni_texty/vlastnosti%20zemin.pdf. Studijní opory.

- [7] Prefabricated vertical drains for Soil Consolidation: Vertical drain design. In: *Geosynthetics world* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/geosyn/pvd-soil-consolidation-design?next_slideshow=
- [8] Colbondrain CX1000: Product Information. In: *Geosyntetika, s.r.o.* [online]. Praha: Geosyntetika, c2007-2008 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.geosyntetika.cz/files/download/colbondrain-ce-ed-354-gba-cx1000.pdf>
- [9] Precompression and Vertical Drains. PURUSHOTHAMA, Raj. *Ground Improvement Techniques* [online]. Indie: Laxmi Publications, 2005, s. 82-118 [cit. 2017-04-13]. ISBN 978-8170088370. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/109952895/Ground-Improvement#>
- [10] Application of Sand Drains. In: *Foundation, Concrete and Earthquake Engineering* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://civil-engg-world.blogspot.cz/2008/11/appilication-of-sand-drains.html>
- [11] FOX, Greg a Jenna SCORZA. Prefabricated Vertical Drains. In: *Geoengineer* [online]. Geoengineer.org, 2000 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/select-topics-in-ground-improvement/prefabricated-vertical-drains?showall=1&limitstart=>
- [12] Prefabricated vertical drains. KIRSCH, Klaus a Alan BELL. *Ground Improvement, Third Edition* [online]. 3rd ed. USA: CRC Press, 2013, s. 87-169 [cit. 2017-04-13]. ISBN 9780415599214. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=pWaRpPfmHOYC&pg=PA114&lpg=PA114&dq=ground+improvement+third+edition+pdf&source=bl&ots=U-H2iRuNsD&sig=WB-dSewVne6xcx0m90oAqernU-s&hl=cs&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwiLqM3DoJXSAhWqK8AKHZtwB8AQ6AEIUDAI#v=onepage&q=ground%20improvement%20third%20edition%20pdf&f=false>

- [13] Teorie: Výpočet pomocí edometrického modulu. In: *Fine: Online nápověda* [online]. Česká Republika: Fine spol. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/vypocet-pomoci-edometrickeho-modulu-01/>

- [14] Prefabricated vertical wick & strip drains. In: *American Wick Drain* [online]. USA: American Wick Drain Corporation, 2009 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.americanwick.com/uploads/documents/WICK%20Drain%20Brochure1.pdf>

- [15] Properties of Prefabricated Vertical Drain and Quality Control Tests: Soil Improvement: Prefabricated Vertical Drain Techniques. In: *Encyclopedia.com* [online]. c2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.encyclopedia.com/construction/engineering-construction-and-transportation-magazines/properties-prefabricated-vertical-drain-and-quality-control-tests>

- [16] Precompression and Vertical Drains. PURUSHOTHAMA, Raj. *Ground Improvement Techniques* [online]. Indie: Laxmi Publications, 2005, s. 82-118 [cit. 2017-04-13]. ISBN 978-8170088370. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/109952895/Ground-Improvement#>

- [17] BERGADO, D. T., R. MANIVANNAN a A.S. BALASUBRAMANIAM. Filtration Criteria for Prefabricated Vertical Drain Geotextile Filter Jackets in Soft Bangkok Clay. *Geosynthetics International* [online]. Vol. 3. Minnesota: Industrial Fabrics Association International, 1996, s. 63-83 [cit. 2017-04-16]. ISSN 1072-6349. Dostupné z: http://www.academia.edu/23596375/FILTRATION_CRITERIA_FOR_PREFABRICATED_VERTICAL_DRAIN_GEOTEXTILE_FILTER_JACKETS_IN_SOFT_BANGKOK_CLAY

- [18] Typar SF: Technická příručka. *DuPont* [online]. Lucembursko: Dupont de Nemours and Company, 2002 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.dupont.co.uk/content/dam/dupont/products-and-services/construction-materials/geotextiles/documents/Typar-UK/Typar-UK-brochure/Typar-UK-brochureCZ-technical-handbook.pdf>

- [19] ISO 18325. *Geosynthetics - Test method for the determination of water discharge capacity for prefabricated vertical drains*. 1. International Organization for Standardization, 2015.

- [20] ERIKSSON, U., S. HANSBO a B. A. TORSTENSSON. Soil improvement at Stockholm-Arlanda Airport. *Ground Improvement* [online]. 4. London: ICE - Institution of Civil Engineers, 2000, s. 73-80 [cit. 2017-04-19]. ISBN ISSN 1755-0750. Dostupné z:
http://cofra.sk/files/documents/technicke_spravy/arlandamd88.pdf

- [21] PRELOVSKÝ, Branislav a Stanislav HRIC. *Urychlenie konsolidácie násypov pomocou vertikálnych prefabrikovaných drénov Mebradrain* [online]. In: Bratislava: Cofra-Chemia spol. s r.o., s. 1-4 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z:
http://cofra.sk/files/documents/technicke_spravy/mebra_urychlenie.pdf

- [22] Rychlostní komunikace R55 Skalka – Hulín: Sanace podloží vysokých násypů a mostu šterkovými pilíři. In: *KELLER* [online]. Praha: KELLER – speciální zakládání, spol. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.kellergrundbau.cz/wp-content/uploads/2014/09/12-20CZi-R-55-Skalka-Hul%C3%ADn.pdf>

- [23] 3D tiskárna - jak vlastně funguje a kterou si vybrat. In: *3Dees: Form your ideas* [online]. Praha: Naviga 4 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z:
<http://www.3dees.cz/3d-tiskarna-jak-vlastne-funguje-a-ktou-si-vybrat/>

- [24] REJL, Oldřich. 3D tisk a jeho využití ve stavebnictví. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2014 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/11123-3d-tisk-a-jeho-vyuziti-ve-stavebnictvi>

- [25] KELSEY, Chris. The Role of 3D Printing in Geosynthetics. In: *Geosynthetica.net* [online]. Saint Paul, MN: Geosynthetica.net, 2015 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.geosynthetica.net/3d-printing-in-geosynthetics/>

- [26] 3D tisk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk

- [27] (AUTOR NEUVEDEN. *Mário Lenčěš* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20\(semester%201%20-%2010\)%20-%20-/4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/prednasky/KONSOLIDACE-ZEMIN.ppt](http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20(semester%201%20-%2010)%20-%20-/4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/prednasky/KONSOLIDACE-ZEMIN.ppt))

- [28] Mandrels and anchors of various shapes used in the project. In: *ResearchGate* [online]. Berlin: researchgate.net, c2008-2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/281610640_fig2_Fig-2-Mandrels-and-anchors-of-various-shapes-used-in-the-project

- [29] Teorie: Konsolidace. In: *Fine: Online nápověda* [online]. Česká Republika: Fine spol. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/konsolidace-02/>

Seznam tabulek

Tab. 4.2.4.2.1 Přehled filtračních podmínek pro geotextilní filtry [17, s. 67]	32
--	----

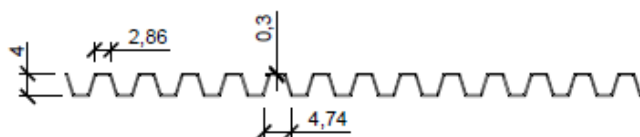
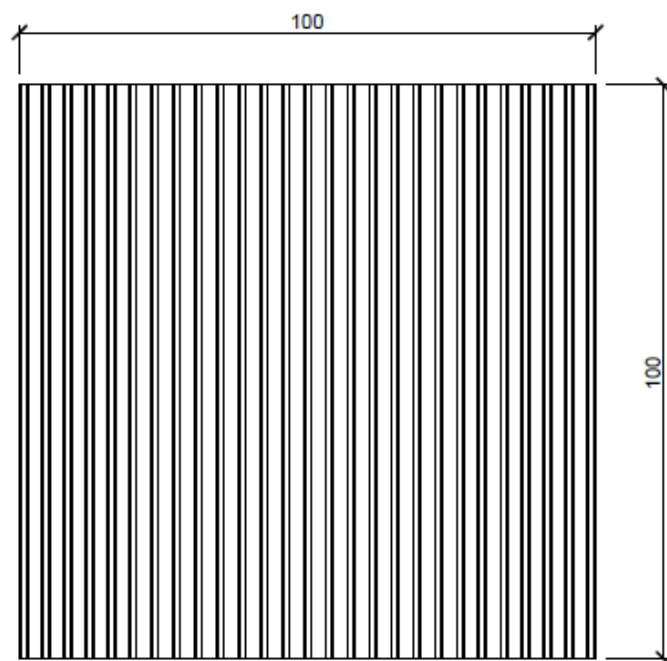
Seznam obrázků


Obr. 2.1 Statický průběh napětí v zemině při primární konsolidaci [27]	14
Obr. 3.1 Schéma proudění pórové vody k vertikálnímu drénu [5, upr.]	15
Obr. 4.1.1 Instalace pískové piloty vibračním zarážením [27]	19
Obr. 4.1.2 Schéma konstrukce pískových drénů [10, upr.]	20
Obr. 4.2.2.1 Schéma návrhu PVD drénů s a) čtvercovou sítí; b) trojúhelníkovou sítí [10]	22
Obr. 4.2.3.1 Tvary příčného řezu jádra PVD [27]	24
Obr. 4.2.4.2.1 Způsoby omezení permeability filtru [17, s. 64, upr.]	28
Obr. 4.2.4.2.2 Filtrace částic zeminy v okolí drénu [17, s. 65, upr.]	29
Obr. 4.2.4.4.1 Smear zóna v okolí vertikálního drénu [17, s. 97, upr.]	34
Obr. 4.2.5.3.1 Schéma zkušebního přístroje na stanovení průtokového množství [19, upr.] ..	37
Obr. 4.2.5.3.2 Schéma rámu pro ohyb drénu [19, upr.]	38
Obr. 4.2.6.1 Nejpoužívanější průřezy trnů při instalaci PVD [28, upr.]	39
Obr. 4.2.6.2 Schéma instalace PVD [11, upr.]	40
Obr. 5.1.1 Grafický výstup průběhu instalace [21, s. 3, upr.]	42
Obr. 5.3.1 Vibrování štěrkových pilířů [22]	44
Obr. 6.2.1 Modely vertikálních drénů	46
Obr. 6.3.1 3D tisk vertikálního drénu	46
Obr. 6.3.2 Alternativa za nepovedený výtisk 2. modelu	47
Obr. 6.4.1 Vzorky PVD v odvodněné zemině při prvním pokusu	48
Obr. 6.4.2 Vzorky PVD po 4 hodinách při druhém pokusu	49

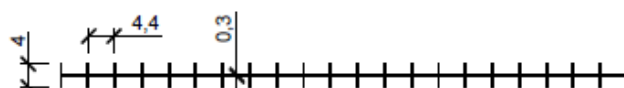
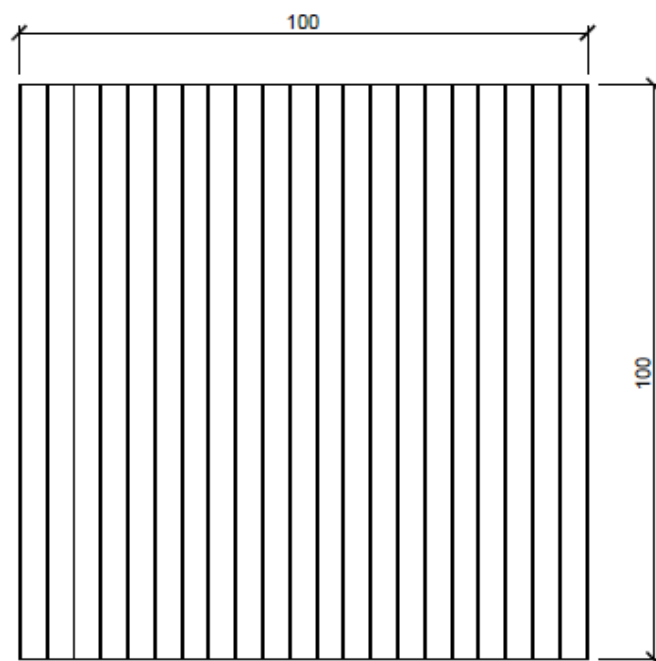
Seznam vzorců

Vzorec 2.1 Výpočet totálního napětí [1]	13
Vzorec 3.1 Výpočet jednoosé konsolidace ve vertikálním směru [1].....	15
Vzorec 3.2 Výpočet edometrického modulu [6, s. 31].....	16
Vzorec 3.3 Výpočet součinitele konsolidace z edometrické zkoušky [29].....	16
Vzorec 3.4 Výpočet celkového času pro dosažení požadovaného stupně konsolidace [6].....	16
Vzorec 3.5 Výpočet celkového času s dosazením konkrétních hodnot [7].....	17
Vzorec 3.6 Výpočet ekvivalentního průměru PVD s dosazením konkrétních hodnot [7].....	17
Vzorec 3.7 Výpočet průměr odtokového válce PVD s dosazením konkrétních hodnot [7]	17
Vzorec 3.8 Celkový čas konsolidace dle Kjellmana s dosazením konkrétních hodnot [2].....	17
Vzorec 4.2.2.1 Celkový čas konsolidace dle Kjellmana [2]	23
Vzorec 4.2.2.2 Výpočet ekvivalentního průměru PVD [7].....	23
Vzorec 4.2.2.3 Výpočet sedání zeminové vrstvy [13]	23
Vzorec 4.2.4.1.1 Výpočet průtokového množství dle Darcyho [15].....	26
Vzorec 4.2.4.1.2 Výpočet rychlosti proudění [15].....	26
Vzorec 4.2.4.1.3 Výpočet průtokového faktoru [12, s. 109].....	27
Vzorec 4.2.4.1.4 Podmínka pro určení požadovaného průtokového množství [12, s. 109]	27
Vzorec 4.2.4.2.1 Výpočet koeficientu propustnosti [18, s. 54].....	29
Vzorec 4.2.4.2.2 Výpočet hydraulického gradientu [18, s. 54].....	29
Vzorec 4.2.4.2.3 Výpočet transmisivity filtru [18, s. 54].....	30
Vzorec 4.2.4.2.4 Výpočet permitivity filtru [18, s. 54].....	30
Vzorec 4.2.4.4.1 Výpočet průměru smear zóny [12, s. 98].....	33
Vzorec 4.2.5.2.1 Výpočet permeability filtru při laboratorní zkoušce [15]	36
Vzorec 4.2.5.3.1 Výpočet průtokového množství dle Darcyho při laboratorní zkoušce [19]..	37

Přílohy

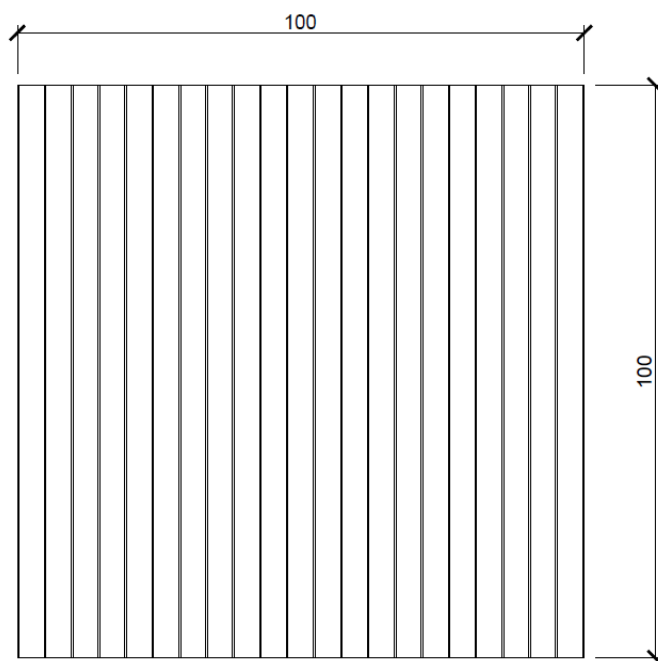


VEDOUCÍ BP	VYPRACOVAL	KONZULTANT BP	FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA		
doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	MICHAL STEINER	doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	KATEDRA: GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ 224		
NÁZEV BAKALÁŘSKÉ PRÁCE					
ODVODNĚNÍ ZEMINOVÉHO PODLOŽÍ POMOCÍ VERTIKÁLNÍCH DRÉNŮ					
			FORMÁT	1XA4	
			DATUM	KVĚTEN 2017	
			OBOR	3647R017	
			ŠK.ROK	2016/2017	
NÁZEV VÝKRESU			MĚŘITKO	ČÍSLO VÝKRESU	
POHLEDY MODELU 1			M 1:1	1	



VEDOUCÍ BP doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	VYPRACOVAL MICHAL STEINER	KONZULTANT BP doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA
NÁZEV BAKALÁŘSKÉ PRÁCE ODVODNĚNÍ ZEMINOVÉHO PODLOŽÍ POMOCÍ VERTIKÁLNÍCH DRÉNŮ			KATEDRA: GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ 224
			FORMÁT 1XA4
			DATUM KVĚTEN 2017
			OBOR 3647R017
			ŠK.ROK 2016/2017
NÁZEV VÝKRESU POHLEDY MODELU 2			MĚŘÍTKO M 1:1
			ČÍSLO VÝKRESU 2

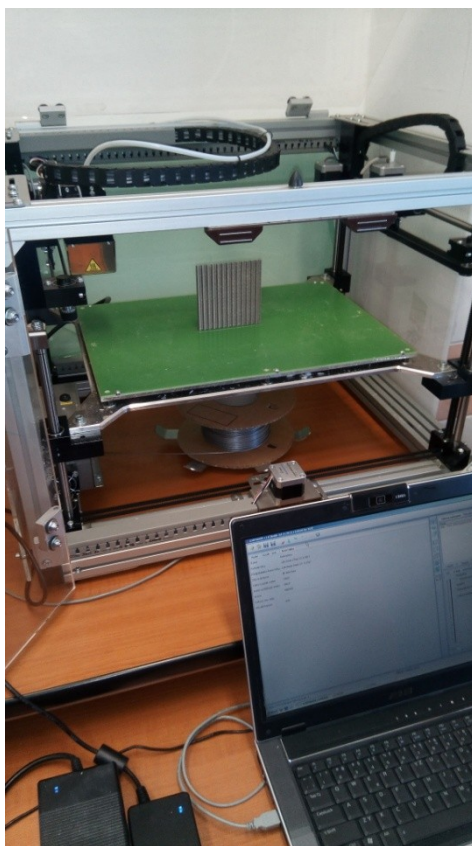




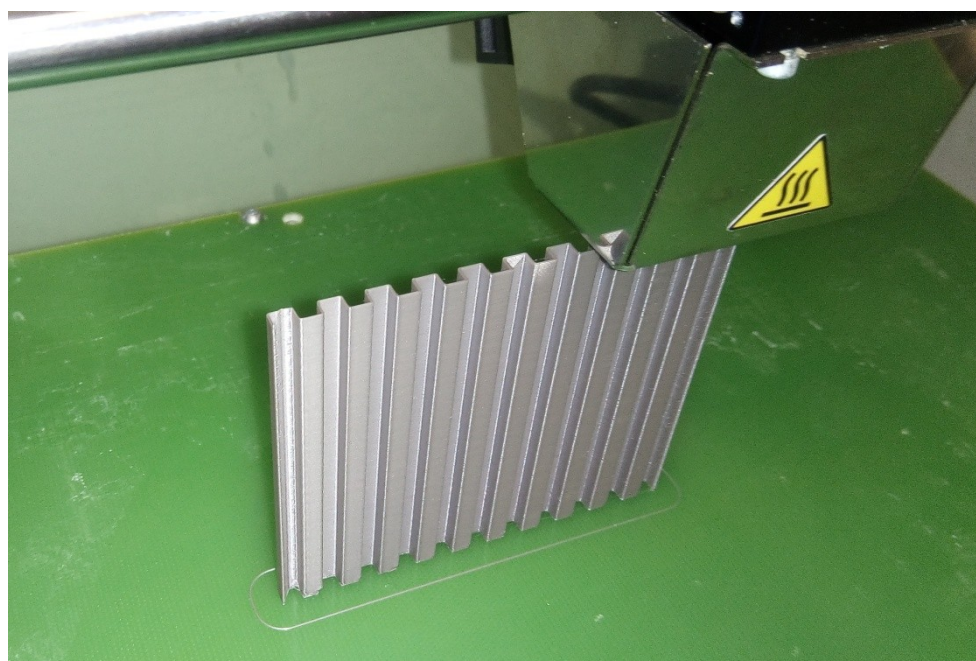
VEDOUCÍ BP doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	VYPRACOVAL MICHAL STEINER	KONZULTANT BP doc. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ Ph.D.	FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA
NÁZEV BAKALÁŘSKÉ PRÁCE ODVODNĚNÍ ZEMINOVÉHO PODLOŽÍ POMOCÍ VERTIKÁLNÍCH DRÉŇŮ			KATEDRA: GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ 224
NÁZEV VÝKRESU POHLEDY MODELU 3			FORMÁT 1XA4
			DATUM KVĚTEN 2017
			OBOR 3647R017
			ŠK.ROK 2016/2017
			MĚŘÍTKO M 1:1
			ČÍSLO VÝKRESU 3



Fotodokumentace 3D tisku



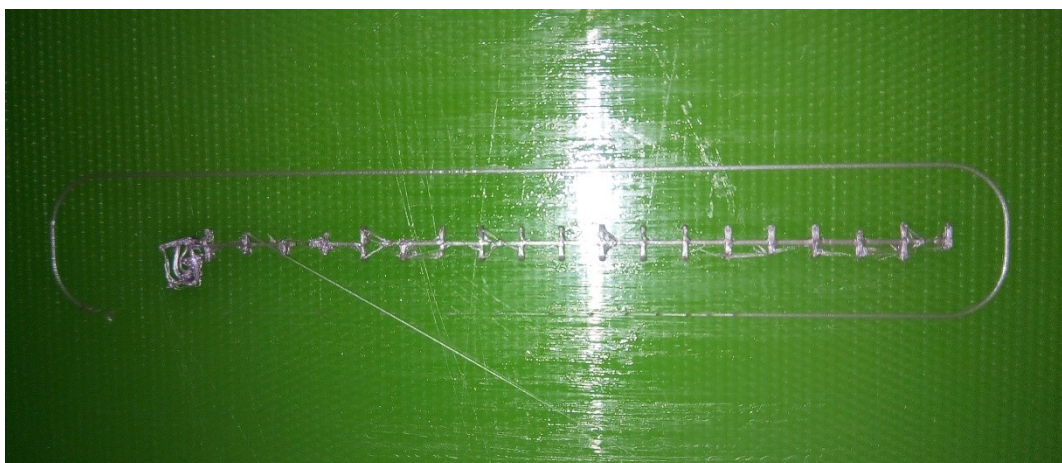
Obr. 2.1 Průběh 3D tisku (foto doc. Ing. Vladislav Křivda, Ph. D)



Obr. 2.2 Detail tiskové hlavy a vzorku (foto doc. Ing. Vladislav Křivda, Ph. D)



Obr. 2.3 Vytisknutý první vzorek (foto doc. Ing. Vladislav Křivda, Ph. D)

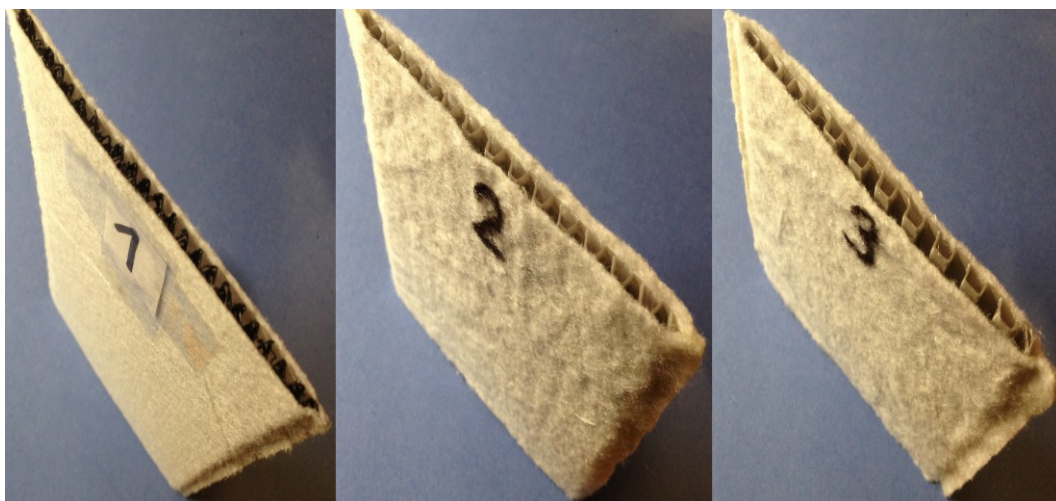


Obr. 2.4 Nepovedený tisk druhého vzorku (foto doc. Ing. Vladislav Křivda, Ph. D)



Obr. 2.5 Vytisknutý třetí vzorek (foto doc. Ing. Vladislav Křivda, Ph. D.)

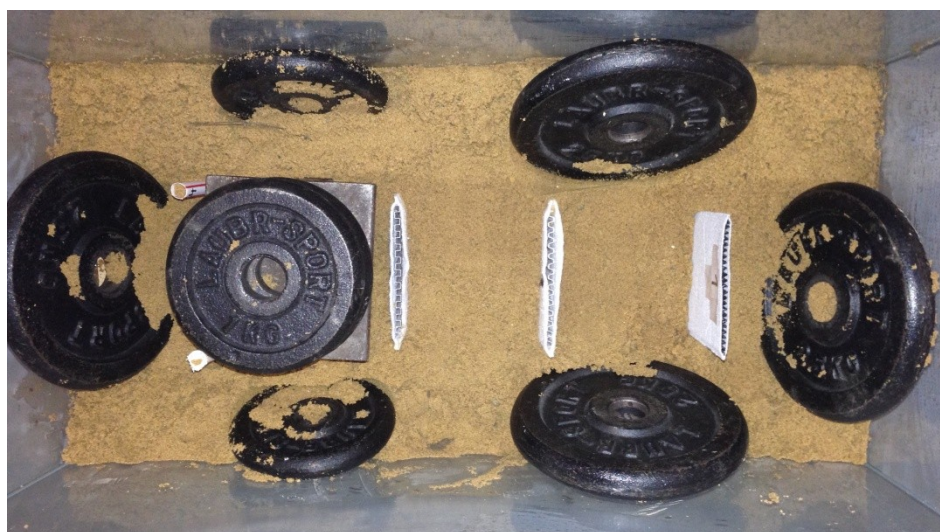
Fotodokumentace výukového modelu funkce vertikálních drenů



Obr. 3.1 Vzorky drenů obalené geotextilií (foto autor)



Obr 3.2 Zemina před odvodněním při prvním pokusu (foto autor)



Obr. 3.3 Písková vrstva a závaží jako simulace násypu (foto autor)



Obr. 3.4 Drény v odvodněné zemině po prvním pokusu (foto autor)



Obr. 3.5 Drény v zemině před odvodněním při druhém pokusu (foto autor)



Obr. 3.6 Dřevěná deska a písková vrstva před zatížením (foto autor)



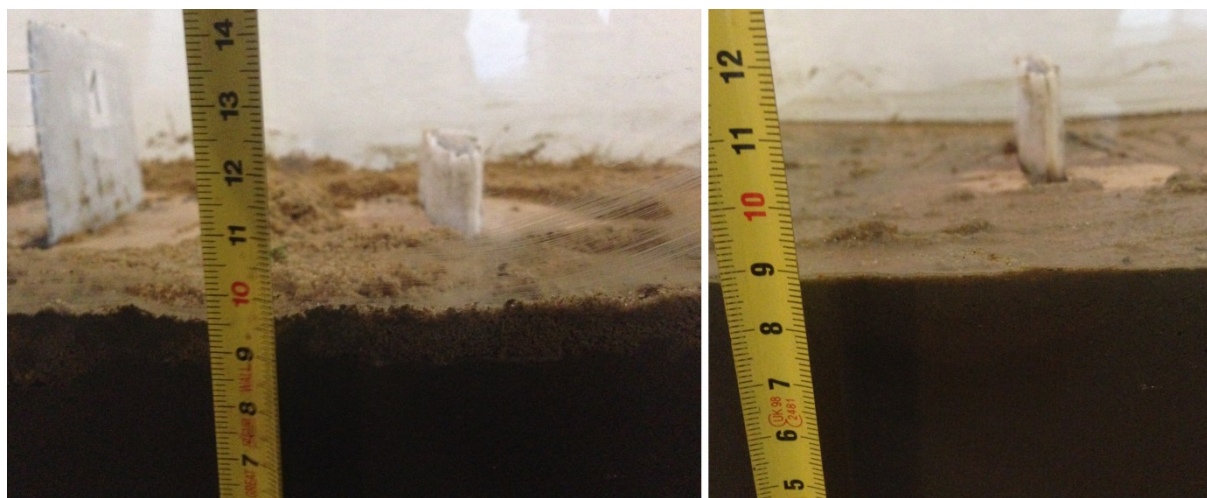
Obr. 3.7 Vzorek č. 1 při odvodňování s vyznačenou hladinou vystoupané vody (foto autor)



Obr. 3.8 Vzorek č. 2 při odvodňování s vyznačenou hladinou vystoupané vody (foto autor)



Obr. 3.9 Vzorky drénů po odvodnění s viditelnou vodou na povrchu (foto autor)



Obr. 3.10 Srovnání možného sednutí zeminy před zatížením a po odvodnění se zatížením (foto autor)